

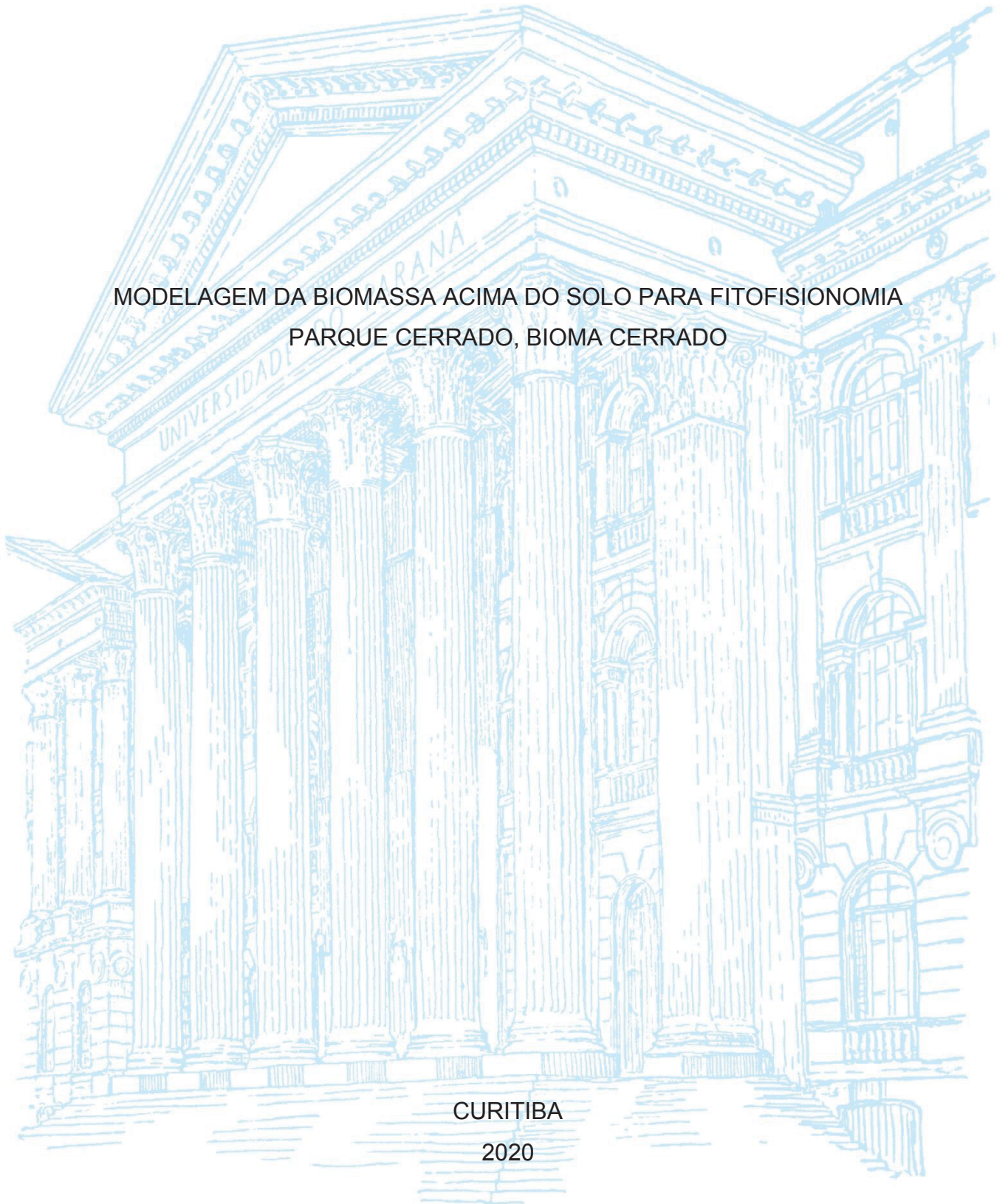
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL MENDES SANTANA

MODELAGEM DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO PARA FITOFISIONOMIA
PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO

CURITIBA

2020



GABRIEL MENDES SANTANA

MODELAGEM DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO PARA FITOFISIONOMIA
PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Coorientadores: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto
Prof. Dr. Fábio Venturoli

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Santana, Gabriel Mendes

Modelagem da biomassa acima do solo para fitofisionomia Parque
Cerrado, bioma cerrado / Gabriel Mendes Santana. - Curitiba, 2020.
61 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Coorientadores: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Prof. Dr. Fábio Venturoli

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
Defesa: Curitiba, 19/02/2020.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Biomassa florestal. 2. Florestas - Modelos matemáticos. 3. Florestas -
Medição. 4. Cerrados. 5. Comunidades vegetais. 6. Teses. I. Sanquetta,
Carlos Roberto. II. Péllico Netto, Sylvio. III. Venturoli, Fábio. IV. Universidade
Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9
CDU – 634.0.548



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GABRIEL MENDES SANTANA** intitulada: **MODELAGEM DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO PARA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO**, sob orientação do Prof. Dr. CARLOS ROBERTO SANQUETTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Fevereiro de 2020.

CARLOS ROBERTO SANQUETTA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CARLA KRULIKOWSKI RODRIGUES PELISSARI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

ALEXANDRE BEHLING

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho aos meus amados pais Ronaldo Santana e Tais Mendes, bem como ao meu irmão Rafael Santana. As minhas conquistas serão para sempre nossas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela capacidade intelectual e companhia durante todo o tempo, me dando força e saúde para a realização deste sonho.

Aos meus pais, Ronaldo Santana e Tais Mendes, que apesar de toda dificuldade encontrada para educar seus filhos, nunca mediram esforços para que isso acontecesse.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Dr. Sylvio Péllico Netto e Professor Dr. Fábio Venturoli, por todas as contribuições realizados durante o mestrado, em especial ao Professor Dr. Carlos Roberto Sanquetta, pelos conselhos, oportunidade e exemplo profissional.

A todos os professores e colegas de graduação do curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Goiás por terem me apoiado a realizar este sonho.

Estendo também os agradecimentos a todos os colegas e amigos que tive a satisfação de fazer durante os dois anos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Não menos importante queria agradecer à Professora Silvia, que me educou por três ou quatro anos durante o ensino básico, me ensinou a interpretar, construir frases, operações matemáticas e tudo aquilo que necessitamos saber antes de obter um título de graduação, mestre ou doutor. Em meio a tantas dificuldades de uma escola municipal com pouco recurso no interior de Goiás, um dos seus “filhos” – como nos chamava – realizou seu sonho através da educação, muito obrigado

Agradeço à Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Os pensamentos de uma pessoa
são como água em poço fundo, mas
quem é inteligente sabe como tirá-los
para fora.

Provérbios 20:5

RESUMO

Os modelos matemáticos para estimar biomassa que não possuem como premissa a relação de dependência, existente entre os componentes da árvore e o total, ainda são poucos estudados em florestas nativas, sobretudo no bioma Cerrado. Nas estimativas de biomassa das árvores, o princípio da aditividade dos componentes da biomassa total acima do solo (AGB) e aditividade da AGB dos indivíduos em relação a AGB da parcela (unidade de área) deve ser respeitada. Aperfeiçoar as metodologias existentes e propor novas formas para estimar a AGB tem sido objeto de estudos de vários pesquisadores nos últimos anos. Sendo assim, a presente pesquisa teve como objetivo propor uma nova metodologia para estimar a biomassa arbórea, acima do solo, para fitofisionomia Parque Cerrado, por unidade de área e comparar essa metodologia com as estimativas realizadas por modelos que estimam a AGB por árvores individuais. Os dados de biomassa acima do solo para os componentes e total foram coletados, pelo método destrutivo, em dez parcelas de 10m x 10m com critério de inclusão de árvores de 5 cm de diâmetro à altura do peito (DAP). Modelos matemáticos para estimar a biomassa total e dos componentes, para árvores individuais foram ajustados independentemente pelo método dos mínimos quadrados ordinários e simultaneamente por NSUR (Regressão Não linear Aparentemente Relacionada). Foi avaliada a consistência biológica das equações nos dois métodos, além da presença de heteroscedasticidade, que, quando observada, foram reajustados após terem os pesos de seus coeficientes calculados pela estrutura de variância. Já para as estimativas de AGB por unidade de área e por espécie, os modelos propostos foram ajustados com o índice fitossociológico que resultou em maior correlação com a biomassa, que foi a Dominância Absoluta (DoA). Duas metodologias foram propostas para estimar a biomassa por unidade de área, com a DoA das espécies dentro da parcela e com a DoA de toda a amostragem, chamada de DoAe. O ajuste simultâneo com a condicionante de que a soma das biomassas das parcelas amostradas deve ser igual a soma das biomassas das espécies amostradas em todas as parcelas, nova metodologia proposta, deve ser preferível a ser aplicada em inventários de biomassa em florestas nativas por obter alta precisão e acurácia. Os resultados demonstram que, enquanto a AGB observada em Mg.ha^{-1} é de 23,5, a metodologia que estima a biomassa por unidade de área, utilizando como variável de entrada a DoA da área total, estimou $23,6 \text{ Mg.ha}^{-1}$, contra $24,3 \text{ Mg.ha}^{-1}$ da metodologia que estima a biomassa por unidade de área e que se utiliza a DoA das espécies dentro da parcela e $30,4 \text{ Mg.ha}^{-1}$ da metodologia que estima a biomassa para árvores individuais. A estimativa gerada para AGB.ha^{-1} pela nova metodologia proposta difere do valor observado pela amostragem destrutiva em 0,48%, enquanto a metodologia atualmente utilizada, que estima a AGB.ha^{-1} por árvores individuais, difere em 32,56% do valor observado, demonstrando maior precisão do que a metodologia usualmente adotada para estimar a biomassa por unidade de área.

Palavras-chave: Ajuste simultâneo. Dominância absoluta. Fitossociologia. Precisão.

ABSTRACT

The mathematical models for estimating biomass that do not have as a premise the dependency relationship, existing between the components of tree and the total are still few studied in native forests, especially in the Cerrado biome. In tree biomass estimates, the principle of additivity of the components of the total above-ground biomass (AGB) and additivity of the individuals AGB in relation to the AGB of the plot (area unit) must be respected. Improving existing methodologies and proposing new ways to estimate AGB has been the subject of studies by several researchers in recent years. Therefore, this research aimed to propose a new methodology to estimate the above-ground tree biomass for the Parque Cerrado phytophysognomy, per unit area and to compare this methodology with the estimates made by models that estimate the AGB of individual trees. The above-ground biomass data for the components and total were collected, by the destructive method, in ten plots of 10m x 10m with the inclusion criterion of trees of 5 cm of diameter at the breast height (DAP). Mathematical models to estimate the total biomass and components, for individual trees, were adjusted independently by the method of ordinary least squares and simultaneously by NSUR (Nonlinear Seemingly Unrelated Regression). The biological consistency of the equations in the both methods was evaluated, in addition to the presence of heteroscedasticity, which, when observed, had their readjustments performed after having the weights of their coefficients calculated by the variance structure. For the AGB estimates per unit area, the proposed models were adjusted with the phytosociological index that obtained the highest correlation with biomass, absolute dominance (DoA). Two methodologies have been proposed to estimate the biomass per unit area, using the DoA of the species within the plot and with the DoA of the entire sample, called DoAe. The simultaneous adjustment with the condition that the sum of the biomass of the sampled plots must be equal to the sum of the species sampled in all plots, a new proposed methodology, it should be preferable to being applied to biomass inventories in native forests as it obtains high precision and accuracy. The results demonstrate that, while the AGB observed in Mg.ha^{-1} is 23,5, the methodology that estimates the biomass per unit area, using the DoA of the total area as an input variable, the conditioner estimated 23,6 Mg.ha^{-1} , against 24,3 Mg.ha^{-1} of the methodology that estimates the biomass per unit area in wich the DoA of the species is used within the plot and 30,4 Mg.ha^{-1} of the methodology that estimates the biomass for invididual trees. The estimate generated for AGB.ha^{-1} by the proposed new methodology differs form the value observed by destructive sampling by 0,48%, while the methodology currently used, wich estimates AGB.ha^{-1} by individual trees, differed by 32,56% of the observed value, showing greater accuracy than the methodology usually adopted to estimate biomass per unit area.

Keywords: Simultaneous adjustment. Absolute dominance. Phytosociology. Precision.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FOTOGRAFIA AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO, FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO NIQUELÂNDIA, GO	20
FIGURA 2 – PARCELAS (10M X 10M) DEMARCADAS EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO, PARA AMOSTRAGEM DESTRUTIVA DA BIOMASSA	21
FIGURA 3 – COMPONENTES FOLHA E FUSTE, DE ÁRVORES, SEPARADOS EM LONAS PARA POSTERIOR PESAGEM E OBTENÇÃO DA BIOMASSA VERDE DO COMPONENTE COPA, EM FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO	22
FIGURA 4 – NÃO ADITIVIDADE DA BIOMASSA DOS COMPONENTES EM RELAÇÃO A BIOMASSA TOTAL, PROVENIENTES DE EQUAÇÕES AJUSTADAS PELO MÉTODO MQNL E WNSUR (A, B) E (C, D) RESPECTIVAMENTE	38
FIGURA 5 – CURVA DO AJUSTE INDEPENDENTE DAS EQUAÇÕES PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIE, UTILIZANDO A VARIÁVEL DOA, EM ÁREA DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO	41
FIGURA 6 – RESÍDUOS NORMALIZADOS, EM VALORES ABSOLUTOS, DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTEMENTE PARA A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIE, PARA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO	42
FIGURA 7 – RESÍDUOS NORMALIZADOS, EM VALORES ABSOLUTOS, DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS SIMULTÂNEAMENTE, PARA AS BIOMASSAS TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIE, PARA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO	43
FIGURA 8 – RESÍDUOS NORMALIZADOS, EM VALORES ABSOLUTOS, DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS SIMULTANEAMENTE PARA A BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO COM A CONDIÇÃO DE QUE $AGBP = AGBE$, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, DO BIOMA CERRADO	44
FIGURA 9 – COMPARAÇÃO DA BIOMASSA OBSERVADA, POR ESPÉCIE, ENTRE A METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DA AGB ($kg.ha^{-1}$) POR ÁRVORES INDIVIDUAIS E POR UNIDADE DE ÁREA, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO	45

FIGURA 10 – BOXPLOT DAS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO (kg.ha ⁻¹) PARA A METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO POR ÁRVORES INDIVIDUAIS E POR UNIDADE DE ÁREA, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO	46
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES EM ÁRVORES DO BIOMA CERRADO, FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO.....	26
TABELA 2 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES DAS ESPÉCIES AMOSTRADAS EM DEZ PARCELAS DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO	34
TABELA 3 - FITOSSOCIOLOGIA, BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES DAS ESPÉCIES AMOSTRADAS EM DEZ PARCELAS DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO	35
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DAS EQUAÇÕES NÃO LINEARES AJUSTADAS PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	35
TABELA 5 – EQUAÇÕES SELECIONADAS, RESULTANTES DO AJUSTE INDEPENDENTE (MQNL) DOS MODELOS, PARA BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL, PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO	37
TABELA 6 – EQUAÇÕES RESULTANTES DO AJUSTE SIMULTÂNEO DE EQUAÇÕES (NSUR) PARA BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL, PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	37
TABELA 7– EQUAÇÕES RESULTANTES DO AJUSTE SIMULTÂNEO DE EQUAÇÕES PONDERADAS (WNSUR) PARA BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	37
TABELA 8 – TABELA DOS VALORES DE χ^2 (QUI-QUADRADO) PARA A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES ENTRE O VALOR OBSERVADO (REAL) E ESTIMADOS PELOS MÉTODOS MQNL E WNSUR, PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS NA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	39
TABELA 9 - CORRELOGRAMA ENTRE OS ÍNDICES FITOSSOCIOLÓGICOS E AS BIOMASSAS DOS COMPONENTES E TOTAL DAS ESPÉCIES	

AMOSTRADAS EM ÁREA DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	40
TABELA 10 – MODELOS NÃO LINEARES AJUSTADOS DE FORMA INDEPENDENTE, UTILIZANDO A VARIÁVEL DOA, PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIES, DE ÁRVORES DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	41
TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE SIMULTÂNEO PARA ESTIMAR A BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL ACIMA DO SOLO EM ESPÉCIES DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO	42
TABELA 12 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE SIMULTÂNEO, REALIZADO PARA A BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO COM A CONDIÇÃO DE QUE $AGB_p = AGB_e$, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, DO BIOMA CERRADO	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	20
2.2 COLETA DE DADOS	21
2.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA HORIZONTAL DA FLORESTA	23
2.4 PREPARO DAS AMOSTRAS	24
2.5 AJUSTE INDEPENDENTE DA BIOMASSA DOS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS.....	25
2.6 AJUSTE SIMULTÂNEO PARA OS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS	26
2.7 DESEMPENHO E CONSISTÊNCIA BIOLÓGICA DOS MODELOS ESTIMADORES DE BIOMASSA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS	28
2.8 AJUSTE DOS MODELOS PARA ESTIMAR BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL POR ESPÉCIE.....	29
2.9 COMPARAÇÃO DAS METODOLOGIAS	32
3. RESULTADOS	33
3.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO INVENTÁRIO DESTRUTIVO DA BIOMASSA FLORESTAL	33
3.2 AJUSTE INDEPENDENTE DA BIOMASSA DOS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS.....	35
3.3 AJUSTE SIMULTÂNEO PARA OS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS	36
3.4 DESEMPENHO E CONSISTÊNCIA BIOLÓGICA DOS MODELOS PARA ESTIMAR BIOMASSA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS.....	38
3.5 AJUSTE DOS MODELOS PARA ESTIMAR BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL POR ESPÉCIE.....	40

3.6 COMPARATIVO ENTRE A MODELAGEM DA BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS E A MODELAGEM DA BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO POR UNIDADE DE ÁREA	44
4. DISCUSSÃO.....	47
4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO INVENTÁRIO FLORESTAL	47
4.2 MODELOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA DE ÁRVORES INDIVIDUAIS.	48
4.3 MODELOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA POR UNIDADE DE ÁREA	51
4.4 COMPARATIVO ENTRE AS METODOLOGIAS DE ESTIMAÇÃO DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO	54
5. CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

A utilização de modelos empíricos que permitam estimar a biomassa florestal por variáveis dendrométricas, é motivada pelo laborioso e oneroso processo de medição da biomassa das árvores. No entanto, apesar dos diversos estudos de modelagem da biomassa por meio de variáveis mensuradas nos inventários florestais, novas metodologias de estimação, mais precisas e acuradas, necessitam ser desenvolvidas.

A modelagem da biomassa está associada ao tema alometria e estudos, como os de West et al., (1997) e Broad (1998), apresentam a teoria geral da modelagem pelas leis da escala alométrica. Essa modelagem, é realizada com o objetivo de encontrar a equação de melhor desempenho para estimativa da biomassa dos componentes e total. Se tratando de um processo trabalhoso e de alto custo, em relação a outras variáveis biométricas na floresta, é comum o emprego de modelos matemáticos que proporcionam estimar a biomassa com uso de variáveis dendrométricas, viabilizando o uso delas por serem determinadas com simplicidade.

Pesquisas realizadas com o objetivo de conhecer a distribuição da biomassa da árvore, principalmente fuste e copa, são alvo de estudos recentes de pesquisadores (SANQUETTA et al. 2015). Na maioria dos casos, ao modelar a biomassa total e dos componentes, o ajuste é realizado de forma independente, sendo executado um para cada compartimento da árvore ou da floresta. Tal ação propicia a não aditividade das equações, ou seja, a soma da biomassa dos componentes encontrados nos modelos ajustados não produz o mesmo resultado que o valor obtido na equação da biomassa total. Apesar de gerar resultados inconsistentes, essa abordagem foi encontrada em 80% dos 50 estudos relacionados ao tema publicado em revistas científicas nos últimos anos (SANQUETTA et al. 2015).

Para Genet et al. (2011), são três as características necessárias para que se possa obter um bom conjunto de equações, capaz de assegurar acurácia na predição de biomassa florestal. A primeira característica é a consistência, que por sua vez, remete à aditividade resultante do fracionamento da biomassa total da árvore em componentes. A segunda característica é a robustez, que é composição

de um sistema de equações funcional para as altas variações da população amostrada com baixa sensibilidade ao processo de amostragem utilizado. A terceira e última característica é a acurácia, definida aqui como a proximidade do valor estimado, encontrado pelo conjunto de equações, e o valor observado pela amostragem destrutiva.

Parresol (1999), pesquisando três procedimentos para garantir a aditividade das equações lineares de biomassa, chegou à conclusão de que o procedimento de Regressões Aparentemente Não Relacionados – *Seemingly Unrelated Regressions (SUR)* – é o que garante os melhores resultados. No mesmo estudo, para garantir a aditividade de equações não lineares, o procedimento de Regressões não Lineares Aparentemente Não Relacionados – *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression (NSUR)* – resultou em estimadores mais eficientes para a biomassa dos componentes da árvore e total (PARRESOL, 2001). No Brasil poucos trabalhos aplicaram tais metodologias, mas nenhum deles para o bioma Cerrado. As maiores contribuições ao tema de ajuste simultâneo para estimar biomassa florestal, foram os desenvolvidos por Sanquetta et al. (2014), Sanquetta et al. (2015) e Behling et al. (2018), este último, justificando a importância da aplicação dos métodos SUR e NSUR para estimativas dessa variável.

O Cerrado, segundo maior bioma brasileiro em extensão, é fortemente pressionado pelas mudanças de uso da terra (SANO et al., 2010), e atualmente, apenas 52% de sua cobertura natural ainda não foi desmatada ou sofreu algum tipo de degradação (INPE, 2018). Dos remanescentes de Cerrado, a sua biomassa e o seu volume de madeira ainda são poucos conhecidos (MIGUEL et al., 2015). A falta de estudos relacionados à quantificação da biomassa no Cerrado, afeta diretamente a qualidade das estimativas de gás carbônico atmosféricos no bioma (PAIVA et al., 2011).

Apesar do uso de equações alométricas permitirem pesquisas relacionadas às estimativas de biomassa arbórea e de seus componentes (GIONGO et al., 2011), não é frequente o uso de equações com ajuste simultâneo para o bioma Cerrado. Portanto, estudos relacionados à obtenção de estimativas adequadas, sobre o estoque de carbono e de biomassa nas diferentes fitofisionomias que compõem o Cerrado, são relevantes (RIBEIRO et al., 2011). Para Rezende et al. (2006), as pesquisas relacionadas à quantificação de biomassa no Cerrado concentram-se em áreas de solos argilosos, principalmente no Distrito Federal e

em Minas Gerais, sendo restritas às variabilidades naturais intrínsecas das árvores daquela fitofisionomia, havendo a necessidade de estudos em outras formações vegetais.

Estudos florísticos e fitossociológicos, em remanescentes florestais e fitofisionomias poucos pesquisadas, são necessários com o objetivo de proporcionar maior conhecimento sobre a diversidade ainda existente (VELAZCO et al., 2015). Para Poorter et al. (2015), tais informações contribuem diretamente para a determinação da biomassa, sobretudo quando relacionadas com as fitofisionomias florestais e a densidade da madeira. A contribuição de cada espécie para o estoque de biomassa e carbono depende de sua abundância (FAUSET et al., 2015). Tal fato afeta diretamente o propósito de aprimorar políticas de conservação destinadas à redução de gases do efeito estufa e preservação ambiental, uma vez que, há a necessidade de entender melhor a relação entre a diversidade florística e o estoque de carbono em florestas tropicais (CAVANAUGH et al., 2014).

Aprimorar as metodologias já existentes e propor novas formas para estimar a biomassa florestal têm sido objeto de estudos de vários pesquisadores nos últimos anos. Henry et al. (2013), revisando a literatura sobre o assunto, mostraram que 24% das equações contêm apenas uma variável independente, geralmente o diâmetro à altura do peito (DAP) tomado a 1,30 m acima do solo. Como a variabilidade existente em florestas naturais é grande, os modelos gerados não promovem boas estimativas em sítios diferentes do que foi gerado. Para Forrester et al. (2017), uma abordagem diferente para obtenção de boas estimativas é utilizar equações específicas para o sítio específico, incluindo outras variáveis independentes, como as climáticas, a densidade, a dominância ou qualquer outra variável que represente o local em que se deseja estimar ou prever a quantidade de biomassa estocada.

Estudos como os realizados por Wang et al. (2003) e Nelson et al. (2014) mostraram que podem ser gerados erros de até 240% quando são utilizados modelos de biomassa em diferentes escalas espaciais. Weiskittel et al. (2015) afirmam que as previsões por meio de modelos em algumas regiões geográficas não são viáveis pelas características únicas, como por exemplo estrutura da vegetação, amplitude de DAP e altura das árvores, e demais fatores locais presentes nessas áreas específicas. Uma das soluções propostas nesse trabalho

é a utilização dos índices fitossociológicos para o ajuste de equações de biomassa por espécie, visando minimizar os erros gerados pelos ajustes, uma vez que, as árvores agrupadas por espécie possuem características semelhantes de crescimento e estrutura.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é propor uma nova metodologia para modelar a biomassa arbórea acima do solo da fitofisionomia Parque Cerrado, pertencente ao bioma Cerrado, utilizando variáveis fitossociológicas, para estimar a biomassa por unidade de área e comparar essa nova metodologia com a usualmente empregada para estimar a biomassa total acima do solo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Os dados utilizados foram coletados em uma área de Parque Cerrado, localizado no município de Nova Crixás, noroeste do estado de Goiás. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo tropical de savana (Aw) com duas estações climáticas bem definidas, verão úmido de dezembro a março e inverno seco predominantemente de julho a agosto, com média anual de temperatura no município variando entre 26°C e 27° (ALVARES et al., 2013). Segundo Santos et al. (2013), o solo da região é classificado como Gleissolos.

Segundo IBGE (2012), a fitofisionomia Parque Cerrado caracteriza-se pela presença de árvores de 2 a 4 metros, formando uma cobertura arbórea de 1 a 10%, agrupadas em áreas predominantemente herbáceas e em solos hidromórficos (FIGURA 1). São encontrados principalmente no Pantanal Matogrossense e Vale do Rio Araguaia, sendo este último o local onde os dados deste estudo foram coletados.

FIGURA 1 – FOTOGRAFIA AÉREA DA ÁREA DE ESTUDO, FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO NIQUELÂNDIA, GO



FONTE: O autor (2019).

Em áreas em que lençol freático encontra-se próximo à superfície, a presença de murundus (pequenas elevações do solo) possibilita a concentração de indivíduos arbustivos, e as espécies arbóreas mais comuns são algumas das

encontradas em outras fitofisionomias do bioma Cerrado, como *Curatella americana*, *Caryocar brasiliense*, *Qualea grandiflora* e *Q. parviflora* (RIBEIRO et al., 1983).

2.2 COLETA DE DADOS

Foram alocadas aleatoriamente dez parcelas com dimensão de 10 m x 10 m (FIGURA 2), utilizando o método de área fixa, seguido do processo aleatório simples de amostragem como preconizado por Péllico Netto; Brena (1997). Todos os indivíduos com DAP igual ou maior a 5 cm foram mensurados entre fevereiro de 2014 e outubro de 2015, sendo a altura total da árvore medida somente após o corte.

FIGURA 2 – PARCELAS (10M X 10M) DEMARCADAS EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO, PARA AMOSTRAGEM DESTRUTIVA DA BIOMASSA



FONTE: O autor (2019).

A área foi selecionada devido a conversão do uso, com supressão da vegetação autorizada pela Secretária de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Goiás (SECIMA): Licença: 2179/2014 — Licença de supressão da vegetação nativa para mudança de uso do solo.

A quantificação da biomassa verde (úmida ou fresca) foi realizada pelo método destrutivo, separando cada árvore em três componentes: fuste com casca, galhos e folhas. Para o presente estudo foram analisados apenas os componentes fuste e copa, este último resultado da soma das folhas e galhos. Com o auxílio de

uma motosserra, os indivíduos foram derrubados e tiveram seus componentes separados. A pesagem do material verde foi realizada imediatamente após a derrubada da árvore, utilizando um dinamômetro com capacidade máxima de 500 kg e precisão de 0,05 kg, com o auxílio de uma lona para depositar o material (FIGURA 3).

FIGURA 3 – COMPONENTES FOLHA E FUSTE, DE ÁRVORES, SEPARADOS EM LONAS PARA POSTERIOR PESAGEM E OBTENÇÃO DA BIOMASSA VERDE DO COMPONENTE COPA, EM FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO



FONTE: O autor (2019).

A altura de fuste utilizada para a determinação da biomassa de fuste (BF) foi definida como a altura do fuste até o diâmetro mínimo de 5 cm com casca, o restante foi considerado como galhos devido à dificuldade de distinção entre fuste e galhos para árvores do bioma Cerrado. Indivíduos com $DAP \geq 5$ cm e que possuíam mais de um fuste tiveram todos os fustes mensurados e pesados conforme o manual de campo para coleta de dados de biomassa, pertencente ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2015), sendo o valor total de BF a somatória da biomassa de todos os fustes. O componente copa foi o resultado da soma dos galhos e folhas (FIGURA 3). Já o componente galhos foi obtido por meio do total de galhos que foram desramados, a partir do diâmetro de 5 cm definido como limite do fuste e início do galho, sem diferenciação por diâmetro. Todas as folhas presentes na árvore foram pesadas.

2.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA HORIZONTAL DA FLORESTA

O levantamento fitossociológico foi realizado com todos os indivíduos amostrados, que foram identificados em nível de espécie e tiveram o DAP e a altura total mensurada. A altura total foi medida após a derrubada das árvores e realizada com o auxílio de uma fita métrica.

As espécies foram identificadas em campo com base em caracteres morfológicos florais e vegetativos. Quando necessário, realizou-se a coleta do material botânico para determinação posterior com auxílio de literatura especializada. As famílias botânicas foram listadas segundo Angiosperm Phylogeny Group/ APG III (APG III, 2009).

Para descrição da comunidade arbórea foram calculados os seguintes índices fitossociológicos, conforme SOUZA E SOARES (2013): Dominância absoluta – DoA (m^2/ha), Densidade absoluta – DA (número de indivíduos/ha), Frequência absoluta – FA (número de parcelas em que determinada espécie ocorreu), Valor de importância – VI e Valor de cobertura – VC. Outros índices, como os valores relativos de frequência, densidade e dominância também foram calculados, porém, não tiveram aplicações neste trabalho.

A DoA expressa a área basal de uma espécie na área e foi calculada conforme [1]. A DA refere ao número de indivíduos de determinada espécie e foi calculada conforme equação [2]. A FA trata-se da relação entre o número de parcelas em que determinada espécie ocorre e o número total de parcelas amostradas e foi calculada conforme [3]. VI e VC são índices obtidos pelas somas de valores relativos de densidade, dominância e frequência, conforme [4] e [5], e fornecem medidas sobre a importância ecológica da espécie na comunidade.

$$DoA = \frac{g_i}{A} \quad (1)$$

$$DA = \frac{n_i}{A} \quad (2)$$

$$FA = \frac{u_i}{N} * 100 \quad (3)$$

$$VI = DR + FR + DoR \quad (4)$$

$$VC = DR + DoR \quad (5)$$

Em que:

gi = área basal total da i -ésima espécie;

ni = número de indivíduos da i -ésima espécie na amostragem;

ui = número de unidades de amostra nas quais foram encontradas a i -ésima espécie;

A = área total amostrada (ha);

N = número total de indivíduos amostrados;

DR = densidade relativa;

FR = frequência relativa;

DoR = dominância relativa.

2.4 PREPARO DAS AMOSTRAS

Para determinar a umidade dos componentes galhos e folhas, foram retiradas amostras de aproximadamente 500g do material, que foram posteriormente embaladas e pesadas no local da coleta, com balança analítica de precisão (0,01g). A amostra de fuste foi composta por três discos com espessura de dois a cinco centímetros, tirados na base do fuste, 1,30 m em relação ao nível do solo e no topo do fuste de cada árvore. As árvores com mais de um fuste tiveram as amostras retiradas em todos os fustes.

Em campo o material foi acondicionado em sacos de polietileno e devidamente identificados. As amostras foram levadas ao Laboratório de Inventário Florestal da Universidade Federal de Goiás (UFG) para a determinação da massa seca.

No laboratório, as amostras, exceto os discos de madeira com casca, foram acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados e secas em estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de $65^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por 72 horas até peso constante. Ao final desse período, duas pesagens foram feitas em dias sucessivos a fim de garantir que o peso estivesse estabilizado. Após a secagem, cada amostra foi pesada novamente em balança de precisão (0,01g).

Para os discos, a pesagem foi realizada após a secagem em estufa a 80°C \pm 2°C por cinco dias até atingirem peso constante. Foi considerado constante, quando o peso era repetido durante três dias (pesagens) seguidos. Após a secagem, obteve-se o peso seco das amostras em balança de precisão (0,01g).

Com base na determinação da massa seca das amostras, foi calculada a biomassa seca total para cada indivíduo. A base de cálculo utilizada para a determinação da umidade levou em consideração os valores de massa úmida e seca das amostras, conforme ABNT NBR 14929 (ABNT, 2017), representado em [6].

$$Um = \frac{PV-PS}{PV} * 100 \quad (6)$$

Em que:

PS = Massa seca (kg);

PV = Massa verde (kg);

Um = Umidade (%).

De posse desses valores foi possível estimar a biomassa seca, em quilos (kg), de cada amostra e extrapolar para o total de cada compartimento da árvore a partir da biomassa verde obtida em campo, conforme Klock et al. (2005), demonstrada em [7].

$$BS = BV * (1 - Um) \quad (7)$$

Em que:

BS = Biomassa seca (kg);

BV = Biomassa verde (kg);

Um = Umidade.

2.5 AJUSTE INDEPENDENTE DA BIOMASSA DOS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Para realizar o ajuste simultâneo das equações, conforme seção 2.6, modelos não lineares foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados não lineares com definição dos estimadores apresentados em Gallante (1987). A

avaliação dos modelos ajustados de forma independente foi a primeira etapa realizada antes do processo de ajuste simultâneo.

Na Tabela 1 estão apresentados os modelos matemáticos [1], [2], [3], [4] e [5], selecionados para o ajuste por meio de estudo prévio, que por sua vez possuem como variáveis de entrada *DAP* (em cm) e *Ht* (em metros). As variáveis de saída foram: biomassa do fuste (BF), biomassa da copa (BC) e biomassa total acima do solo (AGB), todas em quilogramas (kg), representadas somente por *y*.

TABELA 1 – MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES EM ÁRVORES DO BIOMA CERRADO, FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO

Modelo	Equação	Autor
1	$y = \beta_0 * DAP^{\beta_1} + \varepsilon$	Husch
2	$y = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * Ht^{\beta_2} + \varepsilon$	Schumacher-Hall
3	$y = \beta_0 * (DAP^2 * Ht)^{\beta_1} + \varepsilon$	Spurr
4	$y = \frac{DAP^2}{\beta_0 + \frac{\beta_1}{Ht}} + \varepsilon$	Honner
5	$y = DAP^2 * \frac{Ht}{\beta_0 + \beta_1 * DAP} + \varepsilon$	Takata

FONTE: O autor (2019).

Em que: *y* = biomassa do componente (fuste ou copa) e total (kg), *DAP* = Diâmetro à altura do peito (cm), *Ht* = altura total (m) e β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes do modelo.

O desempenho estatístico dos modelos testados foi avaliado com base no coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e raiz quadrada do erro médio (RMSE). O teste de White (1980) a 95% de probabilidade foi aplicado para verificar a hipótese de homogeneidade dos resíduos. As equações ajustadas pelo método independente foram comparadas, quanto ao desempenho e consistência biológica, com as equações ajustadas simultaneamente, a fim de avaliar qual metodologia é mais precisa para estimar a biomassa total e dos componentes acima do solo para árvores individuais na fitofisionomia Parque Cerrado.

2.6 AJUSTE SIMULTÂNEO PARA OS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

A restrição do sistema, resolvido por meio de ajuste simultâneo de equações, foi elaborado conforme descrito abaixo [8]. As equações para BF e BC

que obtiveram melhores parâmetros estatísticos, resultantes dos modelos [1], [2], [3], [4] e [5], foram selecionadas para compor o sistema. Como observado em [8], AGB é resultante da soma dos modelos selecionados para BC e BF, sendo a restrição para o ajuste simultâneo de equações proposta por Chiyenda e Kozak (1984).

$$\begin{aligned} BF &= \beta_{01} * Z^{\beta_{11}} + \varepsilon \\ BC &= \beta_{02} * W^{\beta_{12}} * X^{\beta_{22}} + \varepsilon \\ AGB &= \beta_{01} * Z^{\beta_{11}} + \beta_{02} * W^{\beta_{12}} * X^{\beta_{22}} + \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

Em que:

BF = biomassa do fuste (kg);

BC = biomassa da copa (kg);

AGB = biomassa total acima do solo, $BF + BC$ (kg);

β_{01} , β_{11} , β_{02} , β_{12} e β_{22} = coeficientes do modelo;

Z , W e X = variáveis independentes.

Para resolver o sistema de equações descrito acima, foi empregado o modelo de regressões não lineares aparentemente não relacionadas (*Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* - NSUR). Fundamentado por Parresol (2001), esse método fornece estimadores mais eficientes para a biomassa total e dos componentes, sendo recomendada pelo autor para esse tipo de análise. O método NSUR estima os parâmetros das equações de forma conjunta, de modo que cada equação pode conter informações das outras presentes no sistema.

Para testar a hipótese de homogeneidade dos resíduos, foi aplicado o teste de White (1980), para a equação dos componentes e total, a 95% de probabilidade. Nos casos em que os resíduos foram heteroscedásticos, ou seja, tiveram a hipótese rejeitada, pesos foram aplicados por meio da estrutura de variância e o ajuste simultâneo realizado pelo método de regressão não linear aparentemente não relacionada ponderada (*Weight-Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* - WNSUR), no qual posteriormente, tiveram o teste de heteroscedasticidade realizado novamente.

A metodologia de cálculo dos pesos não é apresentada neste trabalho, mas podem ser encontradas em Harvey (1976) e Parresol (2001). O ajuste das equações por meio do WNSUR foi realizado conforme apresentado por Greene

(2012). O desempenho de cada equação foi avaliado com base no coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e na raiz quadrada do erro médio (RMSE).

2.7 DESEMPENHO E CONSISTÊNCIA BIOLÓGICA DOS MODELOS ESTIMADORES DE BIOMASSA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS

Para avaliar o desempenho das equações de biomassa total e para os componentes, obtidas por meio dos procedimentos descritos nas seções 2.5 e 2.6, foram comparados os valores do coeficiente de determinação ajustado, raiz quadrada do erro médio e heteroscedasticidade dos resíduos. Ainda, para avaliar o desempenho das equações, utilizando dados da amostragem, foram realizadas estimativas de biomassa total e dos componentes para árvore e para a unidade de área (hectare), com os resultados obtidos nas metodologias descritas em 2.5 e 2.6. As estimativas forneceram resultados que foram utilizados para testar a hipótese da nulidade, de que os valores estimados por meio de ajuste independente (seção 2.5) não diferem estatisticamente aos estimados por meio de ajuste simultâneo (seção 2.6), comparadas pelo teste de Qui-quadrado a 95% de probabilidade.

A consistência biológica das equações obtidas em 2.5 e 2.6 foi avaliada pela análise da aditividade da biomassa dos componentes com a biomassa total do indivíduo. Para Parresol (2001), a aditividade das estimativas dos componentes com a biomassa total é uma característica desejável das equações de regressão dos componentes da árvore. Quando a condição apresentada em [9] foi satisfeita, as estimativas foram consideradas consistentes biologicamente, caso contrário, sem consistência biológica.

$$AGB = BF + BC \quad (9)$$

Em que:

BF = biomassa do fuste (kg);

BC = biomassa da copa (kg);

AGB = biomassa total acima do solo, $BF + BC$ (kg).

2.8 AJUSTE DOS MODELOS PARA ESTIMAR BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL POR ESPÉCIE

A relação entre os índices fitossociológicos de todas as espécies amostradas e a biomassa dos compartimentos fuste e copa, e total por espécies, foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson a 95% de probabilidade. A partir do resultado da correlação, um modelo não linear foi gerado e ajustado para a biomassa total acima do solo (AGB em kg.ha⁻¹), bem como a biomassa do fuste (BF em kg.ha⁻¹) e da copa (BC em kg.ha⁻¹) da espécie. A variável dependente utilizada para o ajuste foi a biomassa, e a independente, o índice fitossociológico de maior correlação. O modelo gerado segue o comportamento da lei de potência (*powerlaw*) [10], definida por NIKLAS (1994).

$$y = \alpha * x^{\beta} \quad (10)$$

Em que:

y = variável biológica quantificável;

α = constante de normalização;

x = variável de fácil mensuração;

β = expoente da escala.

Para realizar o ajuste das equações, o índice fitossociológico utilizado como variável independente foi calculado dentro na unidade de área parcela, a fim de aumentar a intensidade amostral, ou seja, DoA, nesse momento, é a dominância da espécie dentro da parcela i .

Com intuito de avaliar o desempenho das equações ajustadas, os seguintes critérios foram utilizados: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}), coeficiente de variação (CV%), teste de heterocedasticidade de White, a 95% de probabilidade definido em White (1980), e análise gráfica dos resíduos.

Em seguida, a fim de assegurar a consistência biológica dos estimadores por meio da aditividade, foi realizado o ajuste simultâneo das equações de biomassa dos componentes e total, pelo método NSUR, respeitando-se a condição

descrita em [11]. O desempenho estatístico dessas equações foi avaliado pelos parâmetros citados anteriormente.

$$AGB_{espécie} = BF_{espécie} + BC_{espécie} \quad (11)$$

Em que:

$AGB_{espécie}$ = Biomassa total acima do solo por espécie ($kg \cdot ha^{-1}$);

$BF_{espécie}$ = Biomassa do fuste por espécie ($kg \cdot ha^{-1}$);

$BC_{espécie}$ = Biomassa da copa por espécie ($kg \cdot ha^{-1}$).

O método de regressões aparentemente não relacionadas (NSUR) foi utilizado pelo fato de as equações ajustadas serem relacionadas entre si, uma vez que a condição descrita em [11] deve ser respeitada para estimar a biomassa total acima do solo. O NSUR difere da modelagem independente, pois trata das estimativas dos parâmetros dos modelos conjuntamente em um sistema de equações (BEHLING et al., 2018). A apresentação do método, assim como a aplicação para modelagem da biomassa de árvores, encontra-se em Parresol (2001).

Em seguida, um segundo ajuste simultâneo foi realizado, com a condição de que o somatório dos valores ajustados para a biomassa total das espécies de cada parcela fosse igual ao valor da biomassa total da parcela. Sendo assim, DoA, nessa segunda metodologia de ajuste por unidade de área, foi igual à soma de todos os DoA da espécie calculado por parcela, sendo chamada de DoAe. A biomassa estimada a partir da variável DoAe foi nomeada como AGBe (biomassa acima do solo por espécie calculada com a variável independente DoAe). O sistema de equações utilizado para esse ajuste está representado em [12].

$$\begin{aligned} AGB_{p1} &= AGB_{e1p1} + AGB_{e2p1} + AGB_{e3p1} + \dots + AGB_{enp1} \\ AGB_{p2} &= AGB_{e1p2} + AGB_{e2p2} + AGB_{e3p2} + \dots + AGB_{enp2} \\ AGB_{p3} &= AGB_{e1p3} + AGB_{e2p3} + AGB_{e3p3} + \dots + AGB_{enp3} \\ &\vdots \\ AGB_{p10} &= AGB_{e1p10} + AGB_{e2p10} + AGB_{e3p10} + \dots + AGB_{enp10} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{10} AGB_{pi} = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^n AGB_{ejpi}$$

Em que:

AGB_p = Biomassa total acima do solo da parcela ($kg \cdot ha^{-1}$);

$AGBe$ = Biomassa total acima do solo da espécie (kg.ha^{-1});

e = espécie;

p = parcela.

Tal condição, contempla a premissa observada nas amostragens destrutivas de campo, de que a soma da biomassa de todos os indivíduos amostrados deve ser igual à soma da biomassa de todas as parcelas. Inserindo o modelo apresentado em [10] no sistema de equações apresentados em [12], tem-se que o sistema de equações ajustados com a condição de que o somatório da biomassa das parcelas seja igual ao somatório da biomassa das espécies encontradas na parcela, está representado em [13].

$$\begin{aligned}
 yp1 &= ye1p1 + ye2p1 + ye3p1 + \dots + yenp1 \\
 yp2 &= ye1p2 + ye2p2 + ye3p2 + \dots + yenp2 \\
 yp3 &= ye1p3 + ye2p3 + ye3p3 + \dots + yenp3 \\
 &\vdots \\
 yp10 &= ye1p10 + ye2p10 + ye3p10 + \dots + yenp10
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} ypi}{\sum_{i=1}^{10} ypi} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^n yejpi}{\sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^n yejpi}$$

Em que:

$$y = \alpha * x^\beta$$

$$X = DoAp$$

e = espécie.

p = parcela.

Assim, o valor estimado de biomassa para a parcela i , deve ser igual à soma dos valores estimados para cada espécie presente na parcela i . Da mesma forma, a soma dos valores estimados para a biomassa de todas as parcelas ($\sum_{i=1}^{10} ypi$), deve ser igual a soma da biomassa estimada para todas as espécies j na parcela i , em todas parcelas i ($\sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^n yejpi$). As estatísticas utilizadas para verificar a precisão dos modelos ajustados simultaneamente foram o coeficiente de determinação ajustado, coeficiente de variação e o teste de heterocedasticidade de White (WHITE, 1980). Para todos os procedimentos estatísticos antes descritos, foi utilizado o software R (R CORE TEAM, 2017).

2.9 COMPARAÇÃO DAS METODOLOGIAS

A melhor metodologia, para estimar a biomassa total e dos componentes acima do solo de árvores individuais foi a que apresentou melhor resultado conforme seção 2.7. Para a comparação das metodologias, a metodologia selecionada na seção 2.7 recebeu o nome de AGB A.I. (AGB estimada por árvores individuais).

A comparação entre as metodologias e o valor observado pela amostragem destrutiva, foi realizada por meio dos valores estimados por unidade de área. Para a biomassa das espécies, como a metodologia selecionada na seção 2.7 estima a biomassa por indivíduo, é necessário somar os valores estimados das árvores da mesma espécie, e então, extrapolar para hectare. Para a biomassa total acima do solo, os valores estimados individualmente na seção 2.7 foram somados e extrapolados para a unidade de área hectare. Como em 2.8 os valores, estimados pelas duas metodologias, são por unidade de área hectare, não é necessário realizar extrapolações.

A metodologia utilizada para estimar biomassa total acima do solo, por unidade de área, das espécies pela variável dominância, como descrito na seção 2.8, foi chamada de AGB DoA. O segundo método, em que $AGBe = AGBp$, descrito na seção 2.8 foi denominado de AGB DoAe.

A fim de se conhecer qual a melhor metodologia para estimar a biomassa acima do solo por hectare ($kg \cdot ha^{-1}$) das espécies e total, as diferentes metodologias foram comparadas. Os valores de AGB em $kg \cdot ha^{-1}$ para cada espécie e total, para os diferentes métodos analisados, foram comparados quanto aos valores estimados em relação ao observado (campo, método destrutivo). Sendo assim, a metodologia que apresentasse valores estimados mais próximos aos valores reais coletados pela amostragem destrutiva (seção 2.2), extrapolada para hectare, assim como menor variação dos resultados, foi considerada a melhor para estimar a biomassa total e dos componentes acima do solo.

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO INVENTÁRIO DESTRUTIVO DA BIOMASSA FLORESTAL

A estatística descritiva dos dados coletados por meio do inventário florestal e amostragem destrutiva está apresentado na Tabela 2. As espécies de menores DAP foram; *Bauhinia forficata*, *Byrsonima crassifolia*, *Byrsonima umbellata* e *Cordia glabrata*. Já as com maior número de indivíduos foram *Byrsonima umbellata* e *Cordia glabrata*, com 24 e 28 respectivamente. A média de AGB composta por BC é de 54,03%, variando entre 66,97% a 18,69%, dependendo da espécie. Já para BF, esse compartimento compõe em média 45,97% da AGB, variando de 33,03% a 81,31%.

Os índices fitossociológicos para todas as espécies encontradas na amostragem realizada nas dez parcelas estão apresentados na Tabela 3. A espécie *Byrsonima crassifolia* apresentou a maior DoA e maior AGB, respectivamente, seguida pelas espécies *Cordia glabrata* e *Buchenavia tomentosa*. As espécies que resultaram em menor dominância e biomassa seca total acima do solo foram *Aspidosperma subincanum*, *Myrocradruon urundeuva* e *Physocalymma sacaberrimum*, todas com DoA de 0,05 e AGB de respectivamente 15,75, 8,34 e 13,56 kg.

TABELA 2 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES DAS ESPÉCIES AMOSTRADAS EM DEZ PARCELAS DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO

Espécies	N	DAP (cm)			Altura total (m)			AGB (kg)			BC (kg)			BF (kg)				
		Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx		
<i>Annona coriacea</i> Mart.	11	5,10	8,38	19,30	3,00	5,44	7,80	2,30	24,60	109,94	1,58	16,17	79,81	65,74	0,72	8,43	30,13	34,26
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart. ex A.DC.	1	7,00	7,00	7,00	7,75	7,75	7,75	15,75	15,75	15,75	7,42	7,42	7,42	47,11	8,33	8,33	8,33	52,89
<i>Bauhinia forficata</i> Link.	3	5,00	5,57	6,40	5,75	6,70	8,50	2,67	6,45	13,63	1,18	3,21	7,01	49,71	1,24	3,25	6,62	50,29
<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth) O. Berg	1	8,00	8,00	8,00	5,50	5,50	5,50	14,08	14,08	14,08	8,93	8,93	8,93	63,43	5,15	5,15	5,15	36,57
<i>Buchenavia tomentosa</i> Eichl.	7	8,60	12,74	18,10	6,70	8,62	11,60	24,40	62,87	112,76	6,91	27,44	46,19	43,65	6,60	35,43	66,57	56,35
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth.	24	5,00	8,55	25,30	3,30	6,68	9,00	6,85	23,29	82,07	4,72	14,79	45,73	63,49	1,74	8,50	44,23	36,51
<i>Byrsonima umbellata</i> Mart. ex A.Juss.	9	5,00	8,39	15,30	3,62	5,50	7,10	4,56	27,41	89,54	2,08	18,36	68,57	66,97	2,13	9,05	31,94	33,03
<i>Cordia glabrata</i> (Mart.) A. DC.	28	5,00	8,17	13,60	4,20	6,75	9,90	3,55	16,46	44,81	1,91	5,93	14,11	36,02	1,64	10,53	33,88	63,98
<i>Curatella americana</i> L.	1	15,60	15,60	15,60	8,00	8,00	8,00	70,24	70,24	70,24	33,00	33,00	33,00	46,99	37,23	37,23	37,23	53,01
<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão.	1	6,90	6,90	6,90	4,90	4,90	4,90	8,34	8,34	8,34	5,26	5,26	5,26	63,11	3,08	3,08	3,08	36,89
<i>Physocalymma sacaberrimum</i> Pohl	1	8,00	8,00	8,00	6,00	6,00	6,00	13,56	13,56	13,56	5,66	5,66	5,66	41,72	7,90	7,90	7,90	58,28
<i>Plenckia populnea</i> Reissek	1	14,00	14,00	14,00	8,10	8,10	8,10	82,51	82,51	82,51	46,21	46,21	46,21	56,00	36,30	36,30	36,30	44,00
<i>Stenocalyx dysentericus</i> (DC.) O. Berg	2	6,10	6,90	7,70	3,00	3,55	4,10	5,14	8,59	12,05	3,37	6,21	9,05	72,29	1,77	2,38	2,99	27,71
<i>Tachigali vulgaris</i> L. G. Silva & H. C.Lima	3	7,30	15,30	28,60	6,60	9,92	15,80	23,31	43,10	70,70	8,17	28,83	64,15	66,89	6,55	14,27	21,13	33,11
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	1	9,60	9,60	9,60	8,00	8,00	8,00	7,54	7,54	7,54	1,41	1,41	1,41	18,69	6,13	6,13	6,13	81,31
Total Geral	94	5,00	8,90	28,60	3,00	6,64	15,80	2,30	25,05	112,76	1,18	13,54	79,81	54,03	0,72	11,52	66,57	45,97
FONTE: O autor (2019).																		

FONTE: O autor (2019).

Em que: DAP = Diâmetro medido a altura de 1,30 m em relação ao solo, AGB = Biomassa total acima do solo (BF + BC), BC = Biomassa do compartimento copa, BF = Biomassa do compartimento fuste, Mín = menor valor encontrado, Méd = Média dos valores encontrados, Máx = Maior valor encontrado e %AGB = participação percentual de cada componente da biomassa

TABELA 3 - FITOSSOCIOLOGIA, BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES DAS ESPÉCIES AMOSTRADAS EM DEZ PARCELAS DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO

Espécie	FA	DoA	DA	VI	VC	BF	BC	AGB
<i>Annona coriacea</i> Mart.	0,12	0,73	110,00	10,00	10,83	92,72	177,90	270,62
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart. ex A.DC.	0,01	0,05	10,00	1,46	0,80	8,33	7,42	15,75
<i>Bauhinia forficata</i> Link.	0,03	0,07	30,00	3,25	2,10	9,74	9,63	19,36
<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth) O. Berg	0,01	0,05	10,00	1,51	0,88	5,15	8,93	14,08
<i>Buchenavia tomentosa</i> Eichl.	0,07	0,95	70,00	11,48	10,27	247,99	192,10	440,09
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth.	0,26	1,92	240,00	21,93	25,95	204,09	354,96	559,05
<i>Byrsonima umbellata</i> Mart. ex A.Juss.	0,10	0,57	90,00	10,45	8,73	81,48	165,20	246,68
<i>Cordia glabrata</i> (Mart.) A. DC.	0,30	1,47	280,00	20,96	25,89	294,84	165,98	460,82
<i>Curatella americana</i> L.	0,01	0,19	10,00	2,16	1,84	37,23	33,00	70,24
<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão.	0,01	0,05	10,00	1,45	0,79	3,08	5,26	8,34
<i>Physocalymma sacaberrimum</i> Pohl	0,01	0,05	10,00	1,51	0,88	7,90	5,66	13,56
<i>Plenckia populnea</i> Reissek	0,01	0,15	10,00	1,99	1,59	36,30	46,21	82,51
<i>Stenocalyx dysentericus</i> (DC.) O. Berg	0,02	0,08	20,00	2,91	1,58	4,76	12,43	17,19
<i>Tachigali vulgaris</i> L. G. Silva & H. C.Lima	0,03	0,76	30,00	7,33	6,83	42,82	86,49	129,31
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	0,01	0,07	10,00	1,61	1,03	6,13	1,41	7,54

FONTE: O autor (2019).

Em que: FA = Frequência absoluta; DoA = Dominância absoluta; DA = Densidade absoluta; VI = Valor de importância; VC = Valor de cobertura; BF = Biomassa do fuste em kg da espécie; BC = Biomassa da copa em kg da espécie; AGB = Biomassa total acima do solo (BF + BC) em kg da espécie.

3.2 AJUSTE INDEPENDENTE DA BIOMASSA DOS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Na Tabela 4 estão apresentadas as estatísticas dos modelos não lineares ajustados, para biomassa dos compartimentos e total das árvores, pelo método dos mínimos quadrados não lineares estimados.

TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DAS EQUAÇÕES NÃO LINEARES AJUSTADAS PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

(continua)			
Modelo	R ² _{ajust}	RMSE	White (valor p)
BF			
$y = 0,04711 * DAP^{2,47770} + \varepsilon$	0,81	5,4376	0,001
$y = 0,01544 * DAP^{2,01859} * Ht^{1,11354} + \varepsilon$	0,88	4,3509	0,001

(continuação)

Modelo	R ² _{ajust}	RMSE	White (valor p)
$y = 0,016303 * (DAP^2 * Ht)^{1,032134} + \varepsilon$	0,88	4,3350	0,001
$y = DAP^2 / (-1,0144 + 57,1685/Ht) + \varepsilon$	0,88	4,4119	0,001
$y = DAP^2 * Ht / (52,5165 + 0,2904 * DAP) + \varepsilon$	0,88	4,3457	0,001
BC			
$y = 0,2882 * DAP^{1,7665} + \varepsilon$	0,35	12,2039	0,1801
$y = 0,42306 * DAP^{2,03796} * Ht^{-0,53118} + \varepsilon$	0,36	12,1362	0,1983
$y = 0,2498 * (DAP^2 * Ht)^{0,6439} + \varepsilon$	0,30	12,7031	0,2285
$y = DAP^2 / (7,870 + -11,776/Ht) + \varepsilon$	0,36	12,1569	0,2837
$y = DAP^2 * Ht / (14,019 + 2,929 * DAP) + \varepsilon$	0,31	12,5525	0,1417
AGB			
$y = 0,24981 * DAP^{2,09688} + \varepsilon$	0,69	13,5714	0,0231
$y = 0,21220 * DAP^{2,01655} * Ht^{0,18081} + \varepsilon$	0,69	13,5954	0,0059
$y = 0,14459 * (DAP^2 * Ht)^{0,82195} + \varepsilon$	0,67	14,1054	0,0767
$y = DAP^2 / (2,563 + 4,222/Ht) + \varepsilon$	0,69	13,6253	0,0151
$y = DAP^2 * Ht / (16,511 + 0,643 * DAP) + \varepsilon$	0,67	13,9500	0,0030

FONTE: O autor (2019).

Em que: BF = biomassa do fuste (kg), BC = biomassa da copa e AGB (kg) = biomassa total acima do solo (kg).

Conforme a Tabela 4, o modelo $y = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * Ht^{\beta_2} + \varepsilon$ (SCHUMACHER e HALL, 1933) apresenta as melhores estatísticas para estimar a biomassa dos componentes e do total, sendo o modelo selecionado para o ajuste simultâneo. O modelo $y = DAP^2 / (\beta_0 + \beta_1/Ht) + \varepsilon$ (Honner), apresentou coeficientes de determinação iguais para os componentes e total quando comparados com o modelo Schumacher-Hall, porém com RMSE maior em todos os ajustes.

3.3 AJUSTE SIMULTÂNEO PARA OS COMPONENTES DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Na Tabela 5 estão apresentadas as equações selecionadas e suas respectivas estatísticas para o ajuste simultâneo. Na Tabela 6 estão apresentadas as equações ajustadas pelo método NSUR. Assim como para o ajuste

independente de equações, a equação para estimar biomassa de copa, obtida pelo método de ajuste simultâneo, apresentou heteroscedasticidade. Sendo assim, todos os demais modelos tiveram seus pesos aplicados pela estrutura de variâncias e foram reajustados utilizando-se o método WNSUR (TABELA 7).

TABELA 5 – EQUAÇÕES SELECIONADAS, RESULTANTES DO AJUSTE INDEPENDENTE (MQNL) DOS MODELOS, PARA BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL, PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO

Equações	R ² _{ajust}	RMSE	White (valor p)
$BF = 0,01544 * DAP^{2,01859} * Ht^{1,11354}$	0,88	4,3509	0,0001 _{sg}
$BC = 0,42306 * DAP^{2,03796} * Ht^{-0,53118}$	0,36	12,1362	0,1983 _{ns}
$AGB = 0,21220 * DAP^{2,01655} * Ht^{0,18081}$	0,69	13,5954	0,0059 _{sg}

FONTE: O autor (2019).

Em que: *BF* = biomassa do fuste (kg), *BC* = biomassa da copa, *AGB* = biomassa total acima do solo (kg), *DAP* = diâmetro a 1,30 metro, *Ht* = altura total, sg = significativo e ns = não significativo.

TABELA 6 – EQUAÇÕES RESULTANTES DO AJUSTE SIMULTÂNEO DE EQUAÇÕES (NSUR) PARA BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL, PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

Equações	R ² _{ajust}	RMSE	White (valor p)
$BF = 0,01486 * DAP^{2,019605} * Ht^{1,130693}$	0,88	4,3174	0,0001 _{sg}
$BC = 0,38476 * DAP^{2,038113} * Ht^{-0,48442}$	0,37	12,0432	0,1943 _{ns}
$AGB = BF + BC$	0,69	13,6429	0,0025 _{sg}

FONTE: O autor (2019).

Em que: *BF* = biomassa do fuste (kg), *BC* = biomassa da copa, *AGB* = biomassa total acima do solo (kg), *DAP* = diâmetro a 1,30 metro, *Ht* = altura total, sg = significativo e ns = não significativo.

TABELA 7 – EQUAÇÕES RESULTANTES DO AJUSTE SIMULTÂNEO DE EQUAÇÕES PONDERADAS (WNSUR) PARA BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

Equações	R ² _{ajust}	RMSE	White (valor p)
$BF = 0,01987 * DAP^{2,00834} * Ht^{1,00618}$	0,88	4,3334	0,0001 _{sg}
$BC = 0,25989 * DAP^{1,91240} * Ht^{-0,12066}$	0,36	12,1312	0,0481 _{sg}
$AGB = BF + BC$	0,68	13,6964	0,0028 _{sg}

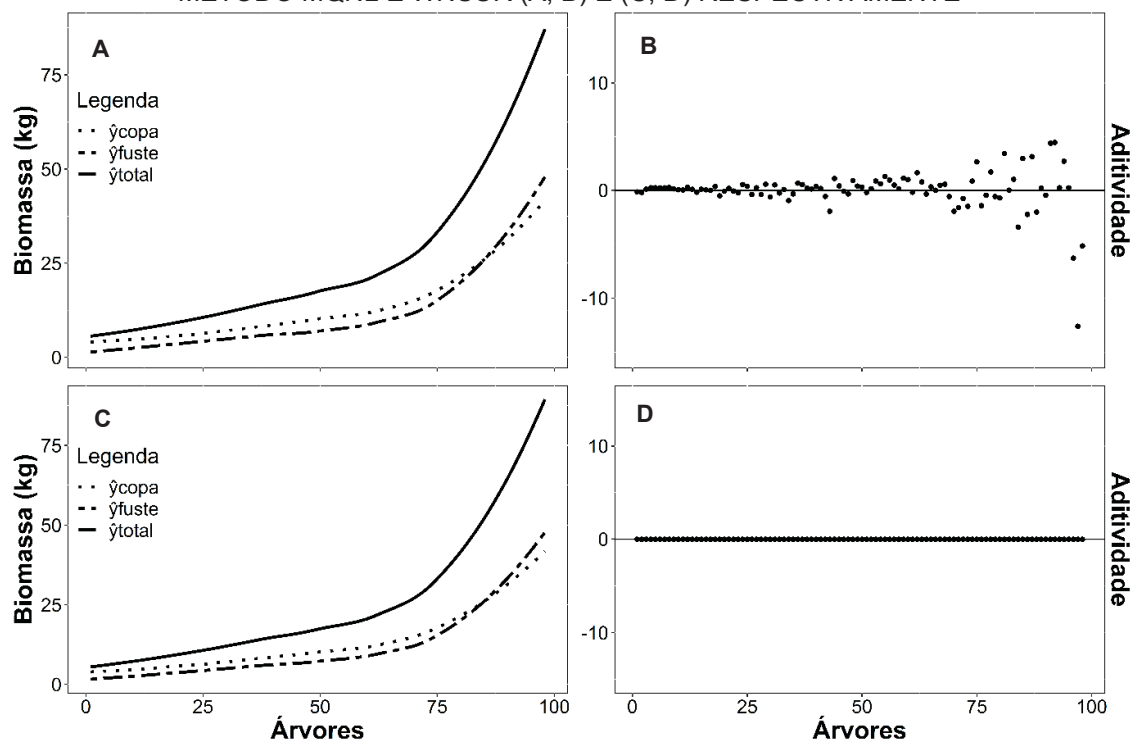
FONTE: O autor (2019).

Em que: *BF* = biomassa do fuste (kg), *BC* = biomassa da copa, *AGB* = biomassa total acima do solo (kg), *DAP* = diâmetro a 1,30 metro, *Ht* = altura total, sg = significativo e ns = não significativo.

3.4 DESEMPENHO E CONSISTÊNCIA BIOLÓGICA DOS MODELOS PARA ESTIMAR BIOMASSA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS

O pressuposto estabelecido em [8], referente à consistência biológica dos modelos, está demonstrado graficamente na Figura 4. Na figura, (A) e (C) são as curvas crescentes, referentes aos valores estimados, para a biomassa total e dos componentes pelos métodos MQNL e WNSUR respectivamente. Os valores plotados em (B) e (D) são os resultantes da equação [8], sendo (B) para as equações estimadas independentemente e (D) para o método de regressões não-lineares ponderadas aparentemente não relacionadas.

FIGURA 4 – NÃO ADITIVIDADE DA BIOMASSA DOS COMPONENTES EM RELAÇÃO A BIOMASSA TOTAL, PROVENIENTES DE EQUAÇÕES AJUSTADAS PELO MÉTODO MQNL E WNSUR (A, B) E (C, D) RESPECTIVAMENTE



FONTE: O autor (2019).

Figura 4 - A – Curva crescente das biomassas dos componentes e total estimadas pelo método de ajuste independente. B – Diferença em kg entre a biomassa total e soma da biomassa dos componentes para o ajuste independente. C – Curva crescente das biomassas dos componentes e total estimadas pelo método de ajuste simultâneo. D – Diferença em kg entre a biomassa total e soma das biomassas dos componentes para o ajuste simultâneo.

A análise do desempenho das equações, seção 2.7, por meio do teste de Qui-quadrado está apresentado na Tabela 8. Os valores obtidos por meio do ajuste independente de equações, ao nível de árvore e por hectare, foram significativos quando comparados ao ajuste realizado por sistemas de equações. Ou seja, os valores estimados por equações ajustadas por meio do procedimento de ajuste independente diferiram estatisticamente dos estimados por meio do procedimento de ajuste simultâneo.

O teste Qui-quadrado mostrou que não há diferença significativa entre as estimativas pelo ajuste simultâneo realizado por WNSUR e o valor real da biomassa dos componentes e total. Para as estimativas obtidas por ajuste independente de equações, método MQNL, e o valor real, o teste Qui-quadrado rejeitou a hipótese nula.

A diferença entre o valor observado e o valor estimado pelo ajuste simultâneo de equações, método WNSUR, foi de 37,94; 127,23 e 165,18 kg.ha⁻¹ para BF, BC e AGB, respectivamente. Entre os valores observados e estimados pelo ajuste independente de equações a diferença foi de 188,11; 101,64 e 284,34 kg.ha⁻¹ para BF, BC e AGB, respectivamente. As estimativas resultantes do ajuste simultâneo de equações, foram mais acuradas do que as estimativas pelo método independente, com exceção da biomassa de copa, onde apresentaram menor diferença entre o estimado e o observado em campo pela amostragem destrutiva.

TABELA 8 – TABELA DOS VALORES DE X² (QUI-QUADRADO) PARA A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES ENTRE O VALOR OBSERVADO (REAL) E ESTIMADOS PELOS MÉTODOS MQNL E WNSUR, PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS NA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

	Real (valor p)	MQNL (valor p)	WNSUR (valor p)
Real	-	0,28963	0,02665
MQNL	0,28963	-	0,27163
WNSUR	0,02665	0,27163	-

FONTE: O autor (2019).

3.5 AJUSTE DOS MODELOS PARA ESTIMAR BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL POR ESPÉCIE

As correlações entre os índices fitossociológicos e a biomassa total e dos componentes das espécies estão demonstrados na Tabela 9. As variáveis se correlacionaram com a AGB das espécies da seguinte forma; DoA (0,96), DA (0,88), FA (0,89), VI (0,92) e VC (0,94). Para a variável BF das espécies, a maior correlação encontrada foi com as variáveis DoA e VC, ambos 0,89. DoA foi índice fitossociológico que mais se correlacionou com a variável BC. Dentre as variáveis dependentes, as que atingiram as maiores correlações foram o VI e o VC. Todos os índices fitossociológicos apresentaram alta correlação com AGB (TABELA 9).

TABELA 9 - CORRELOGRAMA ENTRE OS ÍNDICES FITOSSOCIOLOGICOS E AS BIOMASSAS DOS COMPONENTES E TOTAL DAS ESPÉCIES AMOSTRADAS EM ÁREA DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

	DoA	DA	FA	VI	VC	BF	BC	AGB
DoA	1,00							
DA	0,93	1,00						
FA	0,83	0,73	1,00					
VI	0,97	0,98	0,82	1,00				
VC	0,98	0,98	0,79	0,99	1,00			
BF	0,89	0,86	0,80	0,86	0,89	1,00		
BC	0,92	0,82	0,88	0,89	0,89	0,80	1,00	
AGB	0,96	0,88	0,89	0,92	0,94	0,95	0,95	1,00

FONTE: O autor (2019).

Em que: DoA: Dominância absoluta, DA: Densidade absoluta, FA: Frequência absoluta, VI: Valor de importância, VC: Valor de cobertura, BF: Biomassa do fuste das espécies, BC: Biomassa da copa das espécies, AGB: Biomassa total acima do solo por espécie.

Os modelos ajustados independentemente, com o índice fitossociológico de maior correlação, DoA, estão demonstrados na Tabela 10. O ajuste realizado com a variável biomassa de copa, apresentou desempenho estatístico inferior ao realizado para biomassa do fuste e biomassa total. A equação cuja a variável dependente é AGB por espécie foi a que apresentou melhor desempenho, com R^2_{ajust} de 0,73 e coeficiente de variação da estimativa de 52,59%. Todas as equações ajustadas tiveram a hipótese aceita para o teste de White. As curvas de ajuste para os três modelos ajustados na Tabela 9 estão apresentadas na Figura 5.

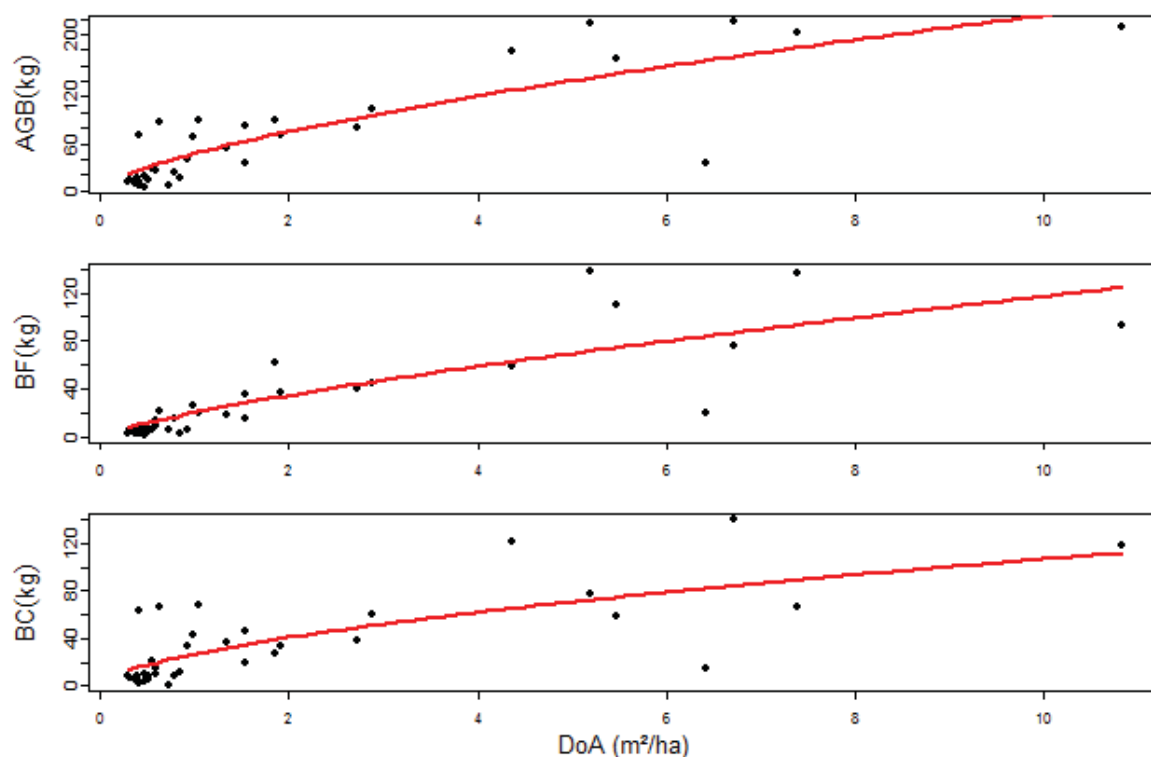
TABELA 10 – MODELOS NÃO LINEARES AJUSTADOS DE FORMA INDEPENDENTE, UTILIZANDO A VARIÁVEL DOA, PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIES, DE ÁRVORES DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

Modelo	β_0	β_1	R^2_{ajust}	CV%	White (p-valor)
$AGB = \beta_0 * DoA^{\beta_1}$	47,74903	0,671803	0,73	52,59	0,043ns
$BF = \beta_0 * DoA^{\beta_1}$	20,95595	0,747118	0,68	68,28	0,003ns
$BC = \beta_0 * DoA^{\beta_1}$	27,23859	0,593342	0,52	69,04	0,039ns

FONTE: O autor (2019).

Em que: $AGBe$ = Biomassa acima do solo da espécie ($kg \cdot ha^{-1}$); BFe = Biomassa do fuste da espécie ($kg \cdot ha^{-1}$); BCE = Biomassa da copa da espécie ($kg \cdot ha^{-1}$); DoA = dominância da espécie ($m^2 \cdot ha^{-1}$); β_0 e β_1 = coeficientes do modelo, ns = não significativo e sg = significativo.

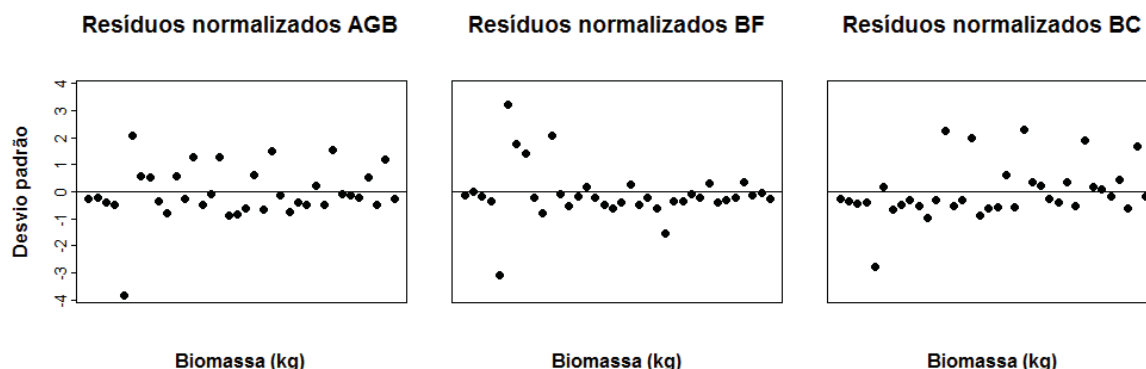
FIGURA 5 – CURVA DO AJUSTE INDEPENDENTE DAS EQUAÇÕES PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIE, UTILIZANDO A VARIÁVEL DOA, EM ÁREA DE FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO



FONTE: O autor (2019).

Na Figura 6 está representada a distribuição dos resíduos absolutos, (em $kg \cdot ha^{-1}$) dos modelos ajustados para a biomassa total e dos componentes, por espécie. O eixo Y é o desvio padrão de cada ajuste, e como observado, para os três modelos estimados os resíduos se distribuíram, em sua maioria, entre dois desvios padrão. Tal comportamento, demonstra que os resíduos possuem distribuição normal, um pressuposto que deve ser atendido nas análises de regressão.

FIGURA 6 – RESÍDUOS NORMALIZADOS, EM VALORES ABSOLUTOS, DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTEMENTE PARA A BIOMASSA TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIE, PARA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO



FONTE: O autor (2019).

As estatísticas do ajuste simultâneo de equações, respeitando o pressuposto estabelecido em [11], estão representadas na Tabela 11. O modelo para estimar a AGB, ajustado pelo método NSUR, foi o que resultou em maior coeficiente de determinação ajustado, 0,73, e menor valor de coeficiente de variação, 52,65%. A Figura 7 ilustra os resíduos normalizados absolutos dos modelos da Tabela 10.

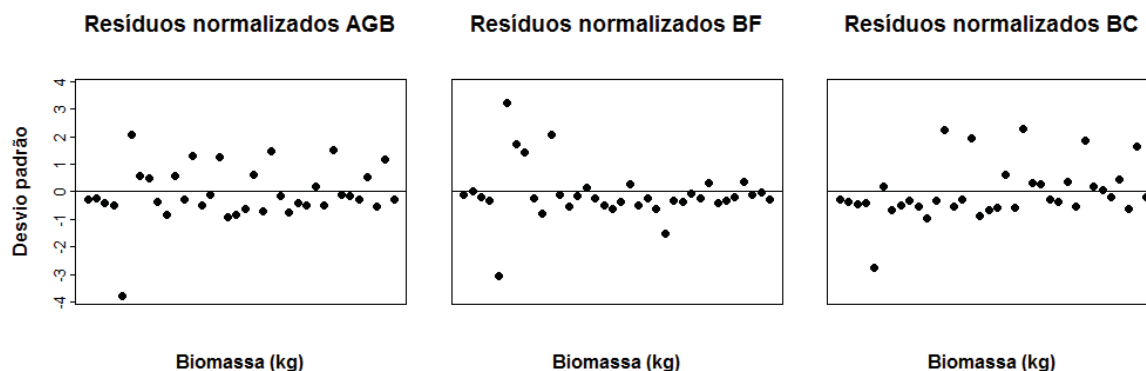
TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE SIMULTÂNEO PARA ESTIMAR A BIOMASSA DOS COMPONENTES E TOTAL ACIMA DO SOLO EM ESPÉCIES DA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO DO BIOMA CERRADO

Modelo	β_0	β_1	R^2_{ajust}	CV%	White (p-valor)
$AGBe = BFe + BCe$	-	-	0,73	52,65	0,048ns
$BFe = \beta_0 * DoA^{\beta_1}$	20,9743	0,74659	0,69	68,28	0,003ns
$BCe = \beta_0 * DoA^{\beta_1}$	27,44244	0,58834	0,54	69,03	0,039ns

FONTE: O autor (2019).

Em que: $AGBe$ = Biomassa acima do solo da espécie ($kg \cdot ha^{-1}$); BFe = Biomassa do fuste da espécie ($kg \cdot ha^{-1}$); BCe = Biomassa da copa da espécie ($kg \cdot ha^{-1}$); DoA = dominância da espécie ($m^2 \cdot ha^{-1}$); β_0 e β_1 = coeficientes do modelo, ns = não significativo e sg = significativo.

FIGURA 7 – RESÍDUOS NORMALIZADOS, EM VALORES ABSOLUTOS, DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS SIMULTÂNEAMENTE, PARA AS BIOMASSAS TOTAL E DOS COMPONENTES POR ESPÉCIE, PARA FITOFISIONOMIA PARQUE CERRADO PERTENCENTE AO BIOMA CERRADO



FONTE: O autor (2019).

O resultado do sistema de equações estabelecido pelas condições descritas em [12] e [13], está representado na Tabela 12. O ajuste, realizado de forma simultânea, para a biomassa total das espécies apresentou melhores indicadores estatísticos de ajuste quando comparados com o ajuste para a biomassa total das parcelas. A Figura 8 ilustra a distribuição dos resíduos normalizados absolutos dos valores ajustados para os modelos presente na Tabela 12.

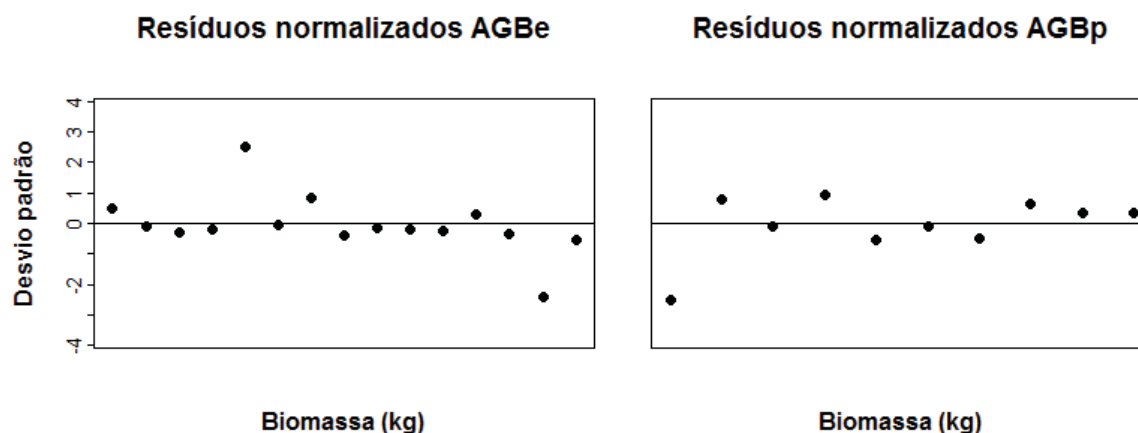
TABELA 12 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE SIMULTÂNEO, REALIZADO PARA A BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO COM A CONDIÇÃO DE QUE $AGB_p = AGB_e$, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, DO BIOMA CERRADO

Modelo	β_0	β_1	R^2_{ajust}	CV%	White (p-valor)
$AGBe = \beta_0 * DoAe^{\beta_1}$	46,0578	0,8390	0,92	33,24	0,037ns
$AGBp = \beta_0 * DoAp^{\beta_1}$	64,6919	0,6844	0,75	27,69	0,041ns

FONTE: O autor (2019).

Em que: $AGBe$ = Biomassa acima do solo das espécies ($kg \cdot ha^{-1}$); $AGBp$ = Biomassa acima do solo das parcelas ($kg \cdot ha^{-1}$); $DoAe$ = dominância das espécies amostradas ($m^2 \cdot ha^{-1}$); $DoAp$ = dominância da parcela, ou seja, soma das dominâncias das espécies presentes na parcela ($m^2 \cdot ha^{-1}$), ns = não significativo.

FIGURA 8 – RESÍDUOS NORMALIZADOS, EM VALORES ABSOLUTOS, DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS SIMULTANEAMENTE PARA A BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO COM A CONDIÇÃO DE QUE AGBP = AGBE, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, DO BIOMA CERRADO



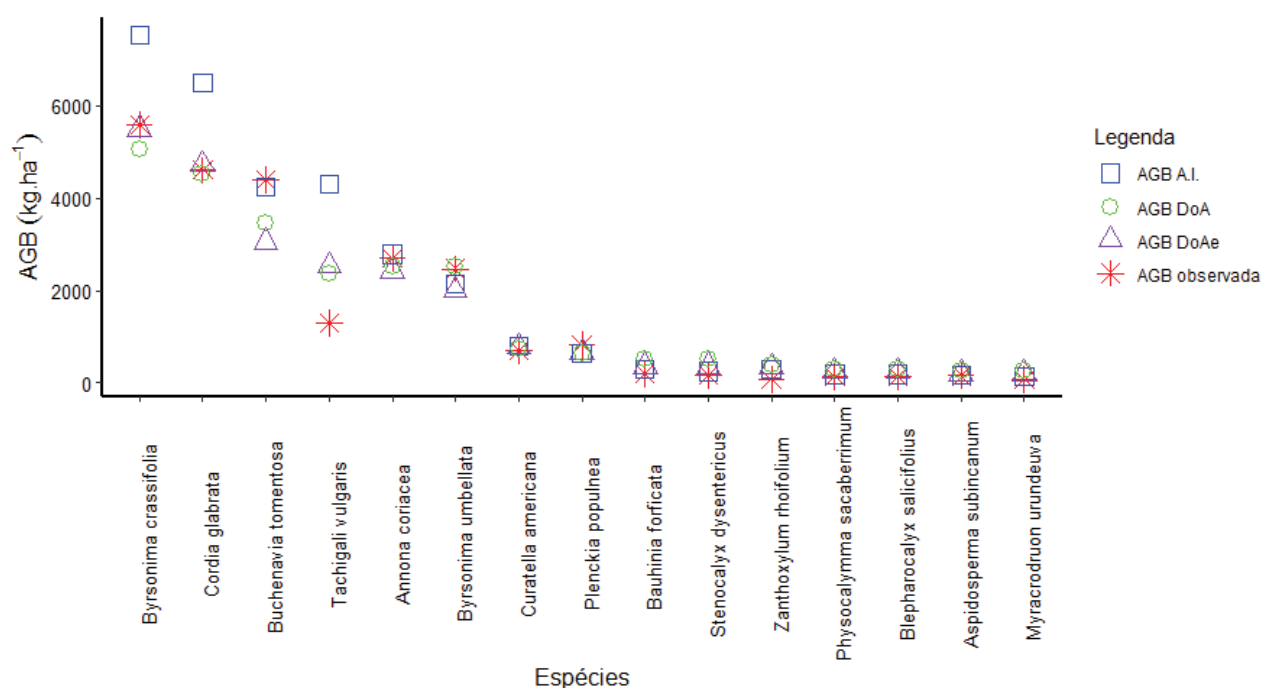
FONTE: O autor (2019).

3.6 COMPARATIVO ENTRE A MODELAGEM DA BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS E A MODELAGEM DA BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO POR UNIDADE DE ÁREA

Na Figura 9 está representado os valores estimados por espécie (ha), conforme seção 2.9. De acordo com a seção 3.4 é observado que, o método WNSUR deve ser utilizado para estimar a biomassa total acima do solo de árvores individuais, por apresentar consistência biológica e maior acurácia. Assim, a metodologia de ajuste por WNSUR, para árvores individuais, foi a selecionada para comparação com os estimadores por unidade de área.

A biomassa estimada por árvores individuais, método WNSUR (AGB A.I.), apresenta valores que superestimam a biomassa quando comparada ao valor observado por meio da amostragem destrutiva (FIGURA 9). As metodologias que estimam AGB por unidade de área (AGB DoA e AGB DoAe) apresentam valores estimados semelhantes entre elas e com os valores observados pela amostragem destrutiva.

FIGURA 9 – COMPARAÇÃO DA BIOMASSA OBSERVADA, POR ESPÉCIE, ENTRE A METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DA AGB ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) POR ÁRVORES INDIVIDUAIS E POR UNIDADE DE ÁREA, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO



FONTE: O autor (2019).

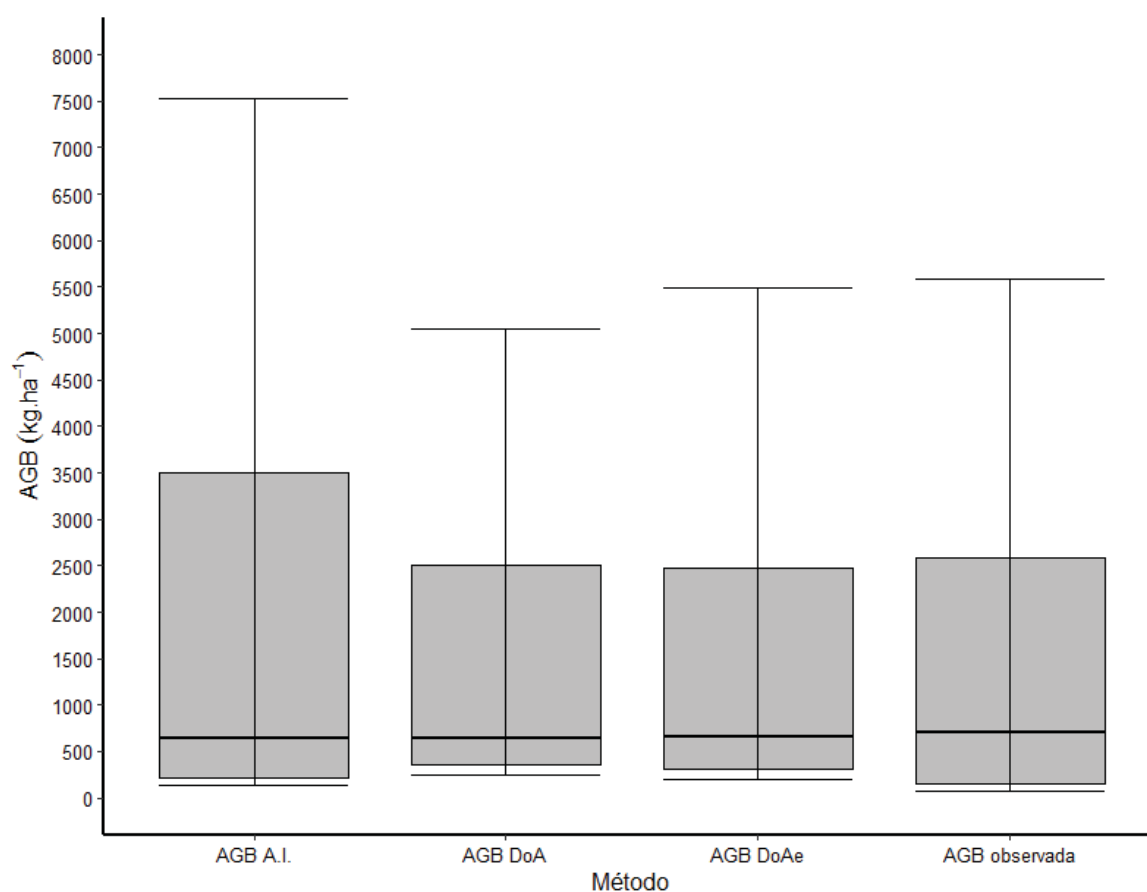
Em que: AGB A.I. = Biomassa acima do solo estimada por indivíduo, método WNSUR em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. AGB DoA = Biomassa acima do solo estimada por unidade de área, onde DoA é calculado dentro de cada parcela. AGB DoAe = Biomassa acima do solo estimada por unidade de área, onde DoA é igual a soma da biomassa de cada espécie calculada dentro de cada parcela. AGB observada = Biomassa acima do solo coletada em campo e extrapolada para ha.

Os valores estimados por AGB A.I. superestimam a biomassa para algumas espécies e para o total das mesmas, além de apresentar maior variância dos dados estimados (FIGURAS 9 e 10). O método que estima a biomassa, utilizando como variável independente a DoA calculada por parcela (AGB DoA), apresenta estimativas semelhantes aos valores observados com a amostragem destrutiva e aos valores estimados pelo método AGB DoAe.

Os métodos AGB DoA e AGB DoAe, estimam a $\text{AGB} \cdot \text{ha}^{-1}$ com menor variabilidade, indicando que as metodologias são mais precisas do que o método AGB A.I. (FIGURA 10). O método AGB A.I. é o que possui estimativas com maior variabilidade. A menor variabilidade dos dados é estimada pelo método AGB DoA, porém, como observado na Figura 10, o método não atinge o valor máximo dos dados observados pela amostragem destrutiva, o que causa a subestimação dos valores de AGB por esse método.

Os valores de mínimo, primeiro e segundo quartil, são semelhantes para as diferentes metodologias e valor observado (FIGURA 10). O terceiro quartil, representado pela parte superior do box no gráfico, para o método AGB A.I apresenta maior variabilidade da estimativa, quando comparado aos demais métodos e ao valor observado. O mesmo acontece com o valor máximo, onde o método AGB A.I superestima os valores. Quanto ao valor máximo, a metodologia que possui estimativas com a variabilidade de AGB mais próximo dos valores observados é a metodologia AGB DoAe.

FIGURA 10 – BOXPLOT DAS ESTIMATIVAS DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) PARA A METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO POR ÁRVORES INDIVIDUAIS E POR UNIDADE DE ÁREA, EM ÁREA DE PARQUE CERRADO, BIOMA CERRADO



FONTE: O autor (2019).

Em que: AGB A.I = Biomassa acima do solo estimada por indivíduo, método WNSUR em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. AGB DoA = Biomassa acima do solo estimada por unidade de área, onde DoA é calculado dentro de cada parcela. AGB DoAe = Biomassa acima do solo estimada por unidade de área, onde DoA é igual a soma da biomassa de cada espécie calculada dentro de cada parcela. AGB observada = Biomassa acima do solo coletada em campo e extrapolada para ha.

4. DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO INVENTÁRIO FLORESTAL

A densidade total da área amostrada foi de 940 ind.ha^{-1} , com dominância de $7,16 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ (TABELA 3). Para a fitofisionomia Parque cerrado não há trabalhos que comprovem se os valores observados para DA e DoA estão dentro da normalidade. Em comparação com a fitofisionomia cerrado *sensu stricto*, uma outra fitofisionomia savânica do bioma, os valores estão dentro da normalidade, uma vez que, segundo Felfili et al. (2000) esses valores para DA variam entre 664 a 1396 ind.ha^{-1} e para DoA entre 5,8 e $11,3 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$.

As espécies de maiores DoA implicam necessariamente nos maiores valores de biomassa do fuste, copa e, conseqüentemente, da biomassa total. Para Biswas e Mukhopadhyay (2018), esse índice expressa a área que o indivíduo (árvore) ocupa em determinado espaço, e segundo Singh et al. (2018) a dominância absoluta define a projeção da área basal à superfície do solo, estando portanto, fortemente correlacionada com a biomassa total da árvore, como encontrado no presente estudo.

A fitofisionomia Parque cerrado apresenta particularidades de cada região em que se situa, com perfil vegetacional próprio, não sendo, portanto, fácil a comparação dos resultados obtidos no Tabela 2 com outros estudos que possuem a mesma fitofisionomia. Sendo assim, espécies dominantes em determinado Parque cerrado, podem ser diferentes em outra área da mesma formação vegetal, assim como a densidade, a frequência e demais indicadores da estrutura horizontal da área (OLIVEIRA FILHO, 1992).

A distância das áreas formadas pela fitofisionomia Parque cerrado e a floresta, segundo Silva et al. (2010), é outro motivo pelo qual as áreas da fitofisionomia Parque cerrado se distinguem entre elas. Para Moraes et al. (2014), existe uma correlação positiva entre o tamanho e altura dos murundus, presente nos Parques cerrados, com a riqueza de espécies, amplitude de DAP e altura da vegetação, sendo, portanto, de difícil comparação e discussão os resultados do Tabela 2.

4.2 MODELOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Os modelos ajustados para biomassa da copa, em árvores individuais, (TABELAS 4, 5, 6 e 7) apresentaram desempenhos inferiores quando comparados aos modelos ajustados para biomassa do fuste e biomassa total acima do solo. A biomassa da copa, formada pelo conjunto de dois componentes (folhas + galhos) apresentam naturalmente maiores variações quando comparada ao componente fuste. A variação desses componentes é influenciada pelas condições ambientais da qual a planta se desenvolve e, conseqüentemente, reflete diretamente nas proporções em que crescem os componentes, bem como sua alometria (POORTER et al., 2012). O baixo desempenho estatístico, também observado pelo baixo coeficiente de determinação dos modelos, é explicado pelo fato de o componente copa sofrer maior influência de fatores internos e externos ao ambiente em que a planta se localiza, como destacado por Satoo e Madgwick (1982) e António et al. (2007).

As estatísticas de ajuste relacionadas ao sistema de equações não apresentaram mudanças consideráveis quando comparadas ao ajuste independente (TABELAS 5 e 6). Isso denota que o método NSUR não possui a característica de melhorar as estatísticas dos ajustes quando comparado ao método dos MQNL, exceto pela aditividade, onde o método NSUR proporcionou consistência biológica às equações, como encontrado também por Sanquetta et al., (2015) e Behling et al., (2018).

Reed e Green (1985) já haviam observado em seu trabalho, estatísticas de qualidade de ajuste de modelos de biomassa semelhantes para os métodos de ajuste independente e simultâneo, alegando ser um efeito direto da flexibilidade dos estimadores para atender à exigência da aditividade dos componentes. Apesar disso, no presente estudo, os diferentes métodos afetaram as predições, uma vez que, as estimativas da biomassa total e dos componentes obtidos de forma independente ou pelo sistema de equações diferiram entre si, conforme apresenta o teste de Qui-quadrado na Tabela 8. Em trabalho realizado com a espécie *Acacia mearnsi*, utilizando a mesma metodologia, Behling et al. (2018) encontrou que os métodos não diferiram entre si, ou seja, não afetaram as predições. Esse fato pode ser explicado pela grande diferença existente entre heterogeneidade de árvores

uma área nativa, como o Parque Cerrado, e a maior homogeneidade comparativa dos plantios de acácia.

Os valores similares para os coeficientes ajustados pelos procedimentos de ajuste independente e simultâneo (TABELAS 5 e 6) são atribuídos ao fato dos regressores, variável explicativa, serem iguais para ambos, caso especial em que as estimativas dos coeficientes por meio do sistema de equações ou individual são equivalentes. Greene (2008), apresenta em seu trabalho resultados semelhantes aos encontrados neste estudo, quanto à equivalência dos coeficientes para os métodos.

Em abordagem comparativa do estimador dos mínimos quadrados generalizados (*Generalized Least Squares* – GLS), equivalente ao procedimento de regressões aparentemente não relacionadas, com o estimador dos mínimos quadrados ordinários (*Ordinary Least Squares* – OLS), equivalente às equações ajustadas independentemente no presente estudo, Greene (2008) observou o mesmo comportamento para os dois diferentes métodos, alegando o fato dos regressores serem iguais para ambos.

A heteroscedasticidade dos resíduos, segundo teste de White, foi encontrada nos modelos ajustados para o compartimento copa. O método de WNSUR, obtido pela estrutura de variância proposto por Harvey (1976) e Parresol (2001), se mostrou eficaz para eliminar a heteroscedasticidade dos modelos para estimar a biomassa da copa para a fitofisionomia Parque Cerrado, como observado no valor p da Tabela 7. Behling et al. (2018) afirmam que essa função estabiliza os distúrbios de variância, permitindo ao estimador ponderado gerar equações com variação mínima e intervalos de confiança mais estreitos. Para os autores, os resultados encontrados com o uso da função ponderada, enfatiza a importância de se realizar a modelagem da estrutura de erros, objetivando garantir estimativas confiáveis tanto dos componentes quanto para a biomassa total.

O método de ajuste simultâneo proporcionou estimativas mais consistentes, estatisticamente, de biomassa para os componentes e total. Resultados similares foram encontrados por Cunha e Briggs (1984); Parresol (1999); Carvalho e Parresol (2003); e mais recentemente por Sanquetta et al. (2015) e Behling et al. (2018), porém nenhum deles trabalhando com árvores do Bioma Cerrado. O resultado encontrado certifica que o estimador por meio de ajuste simultâneo é mais acurado em comparação ao estimador ajustado

independentemente, por serem menores os intervalos de confiança e melhores os intervalos preditos pelos modelos.

A soma das estimativas, obtidas pelo ajuste independente de equações, para a biomassa dos componentes não apresentou aditividade em relação à biomassa total, resultado também observado por outros autores recentemente, como Sanquetta et al. (2015) e Behling et al. (2018). No presente trabalho a não aditividade entre biomassa dos componentes e total apresentou uma relação direta com a biomassa da árvore, pois quanto maior a biomassa da árvore, maior foi sua não aditividade (FIGURA 4). Tal fenômeno é uma consequência do crescimento biológico das plantas, pois à medida que se avança a idade a alocação da biomassa é alterada, proporcionando dificuldades relacionadas às precisões nas estimativas em florestas heterogêneas.

Somente o procedimento de ajuste simultâneo apresentou consistência biológica, como ilustrado na Figura 4. O método considera a interdependência dos componentes e admite as relações alométricas existentes entre eles, além de impor restrições aos coeficientes, garantindo a aditividade das equações. Pesquisas realizadas nos últimos 50 anos realçam a importância de estabelecer equações aditivas de biomassa, dentre elas trabalhos desenvolvidos por Kozak, (1970), Sanquetta et al. (2015) e Behling et al. (2018). A falta de aditividade é uma propriedade indesejável, uma vez que, propaga a inconsistência biológica desde o nível de árvore até nas estimativas para o povoamento como um todo (BEHLING et al., 2018).

Segundo Cunia e Briggs (1984) e Parresol (1999), o cálculo do total de biomassa acima do solo é determinado por três fatores: uso das mesmas variáveis independentes para a estimativa de cada componente, uso das melhores funções de regressão de cada componente e por último, submeter que a soma das regressões para os componentes separadamente sejam igual a biomassa total.

Os ajustes independentes de equações de biomassa para árvores do Cerrado, fitofisionomia Parque Cerrado, geraram resultados inconsistentes biologicamente, implicando, que os modelos para estimar a biomassa dos componentes e total devem ser estimados por meio de equações simultâneas. A maioria das equações desenvolvidas para as florestas brasileiras não apresentam aditividade e consistência biológica, uma vez que foram ajustadas de forma

independente, devendo, portanto, tomar determinadas precauções antes de utilizá-las.

Do mesmo modo, Chiyenda e Kozak (1984) enfatizam não ser realista considerar que os componentes da árvore sejam independentes, uma vez que a mesma árvore fornece valores para mais de um componente da biomassa. Assim, ao considerar essas pressuposições e diante dos resultados obtidos no presente estudo, tem-se que o procedimento de ajuste simultâneo, método WNSUR, fornece estimativas com maior precisão e acurácia para estimar a biomassa acima do solo de árvores individuais para fitofisionomia Parque Cerrado do bioma Cerrado.

4.3 MODELOS PARA ESTIMAR A BIOMASSA POR UNIDADE DE ÁREA

Como observado na tabela de correlação (TABELA 9), todos os índices fitossociológicos analisados apresentam alta correlação, tanto com a biomassa total acima do solo (AGB), quanto com a biomassa de cada componente, seja do fuste (BF) ou da copa (BC). Porém, a DoA foi o índice fitossociológico que obteve maior correlação com a biomassa total e dos componentes. Para Hu et al. (2015), uma variável obtida no próprio sítio de estudo é mais adaptável à condição local, gerando estimativas mais precisas do teor de carbono e da biomassa da área. Nesse sentido, a DoA se mostrou uma variável capaz de gerar predições precisas para estimar a biomassa de uma comunidade, como afirmam os autores, sendo, a variável selecionada para gerar os modelos de estimativas da biomassa total e dos componentes.

Dentre DoA e as variáveis de biomassa, a menor correlação foi observada com a biomassa da copa (BC). Em um estudo realizado no norte do estado do Mato Grosso, trabalhando com a cubagem rigorosa da copa de árvores de florestas nativas, Felfili (1983) concluiu que o volume de galhos representa 30% do volume total daquelas florestas, o que é diferente do amostrado no presente estudo, no qual 55% da biomassa das árvores estão no componente copa. Isso demonstra a heterogeneidade das árvores ocorrentes em diferentes fitofisionomias do Cerrado. Tal resultado pode estar associado com as características específicas de cada espécie, como por exemplo, o padrão de produção de folhas (presença ou ausência), deciduidade, fenologia foliar e arquitetura da copa (DAMASCOS et al., 2005).

As características presente na arquitetura das árvores do Bioma Cerrado, assim como a menor correlação, quando comparada com a biomassa total e do componente fuste, entre DoA e a biomassa do componente copa (TABELA 9), explicam os valores das estatística de ajuste da Tabela 10. O ajuste para estimar BC, como justificado no parágrafo anterior, foi o que apresentou pior desempenho. A amplitude dos dados de biomassa, tanto para os compartimentos quanto para o total (TABELA 2), é a causa principal do alto coeficiente de variação demonstrado nas Tabelas 10 e 11.

As Figuras 5 e 6, que ilustram as curvas de ajuste dos modelos e a distribuição dos resíduos em valores absolutos respectivamente, demonstram que a alta amplitude dos dados de biomassa foi o motivo para que os modelos não apresentassem melhor precisão. Como observado na Figura 6, os maiores erros de estimação para BF são encontrados para valores de menor biomassa. Já para BC, os maiores erros foram gerados em indivíduos cuja biomassa da copa era maior. Para Cunia e Briggs (1984), tais resultados são esperados, uma vez que, a variabilidade da biomassa das árvores de diferentes diâmetros é grande, causando a variância inconstante nos distúrbios das equações para estimar esta variável.

Por outro lado, os modelos ajustados de forma independente, apesar de não garantir a aditividade dos componentes e não apresentarem propriedades biológicas e matemáticas adequadas para estimar a biomassa dos componentes e total das espécies por hectare, não apresentam resíduos heteroscedásticos (TABELA 10). A distribuição dos resíduos absolutos em kg, ilustrado na Figura 6, mostra que aproximadamente 95% deles, gerados a partir das equações ajustadas de forma independente, tanto para biomassa do componente quanto para o total, estão entre -2 a 2 desvios padrões, o que evidencia a ausência de valores não normais ajustado pelas equações.

Segundo Kozak (1970), Chiyenda e Kozak (1984), Parresol (1999), Parresol (2001), Carvalho e Parresol (2003), Sanquetta et al. (2015), Behling et al. (2018), equações para estimar a biomassa dos componentes e total da árvore devem ser ajustadas de forma simultânea, sendo o método a ser utilizado para garantir a aditividade dos componentes e gerar estimativas com consistência biológica. A Tabela 11 apresenta os valores dos coeficientes e as estatísticas do ajuste simultâneo para estimar a biomassa dos componentes e total das árvores por espécie. O ajuste realizado pelo método NSUR não apresentou

heteroscedasticidade, e os motivos são os mesmos relatados no parágrafo anterior. Os valores dos coeficientes observados na Tabela 11, assim como a distribuição dos resíduos (FIGURA 7), não tiveram uma alteração significativa quando comparados com os coeficientes da Tabela 10 e resíduos da Figura 6.

Contudo, a pequena alteração existente, entre o coeficiente de variação em porcentagem (CV%) das equações ajustadas de forma independente e as equações ajustadas de forma simultânea, foi o suficiente para explicar a alteração relacionada a precisão dos modelos. Os modelos ajustados pelo método NSUR subestimaram em 3,15%, 5,11% e 1,43%, a biomassa observada de AGB, BF e BC respectivamente, em kg por hectare. Os modelos ajustados independentemente subestimaram em 2,52%, 5,08% e 1,10% AGB, BF e BC. A diferença entre as duas metodologias se dá pelo próprio método de ajuste, uma vez que os coeficientes estimados pelo método NSUR são forçados a se ajustar de forma que as equações sejam aditivas, sendo lógico esperar que as estimativas das partes não excedam o todo (PARRESOL, 2001). Apesar de apresentar menor acurácia, as equações ajustadas pelo método NSUR possuem maior precisão quando comparada às equações ajustadas de forma independente, como pode-se observar através do coeficiente de determinação.

Observa-se na Tabela 12 que o sistema de equações apresentado em [12], realizado com a variável DoA, apresentou resultados precisos e acurados, principalmente para estimar a biomassa total das espécies por hectare. O alto valor do coeficiente de determinação, baixo coeficiente de variação e a homocedasticidade dos resíduos, inferem que o sistema é a melhor opção a ser usada em inventários de biomassa em florestas nativas. O somatório dos valores preditos para as espécies foi igual ao somatório dos valores preditos para as parcelas, ocorrendo pela flexibilidade do estimador para atender esse requisito, como definido por Reed e Green (1985).

A distribuição dos resíduos normalizados absolutos (FIGURA 8), segundo Behling et al. (2018), é explicado pelo fato de que esse tipo de ajuste produz estimativa com menor variância, sendo do ponto de vista estatístico mais eficiente. Levando em consideração que o somatório da AGB amostrada em campo extrapolado por hectare foi de 23,50 Mg.ha⁻¹ e o somatório das estimativas tanto de AGB_e quanto de AGB_p foi de 23,68 Mg.ha⁻¹, a diferença, em porcentagem entre os valores observados e estimados, foi de 0,57%.

4.4 COMPARATIVO ENTRE AS METODOLOGIAS DE ESTIMAÇÃO DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO

Os valores estimados pela metodologia de ajuste da biomassa acima do solo para árvores individuais (AGB A.I.) superestima os valores observados e estimados pelas outras metodologias, para algumas espécies (FIGURA 9). *B. tomentosa* e *T. vulgaris* foram as espécies que apresentaram maiores variações entre os valores observados e o estimado pelo método AGB A.I. Ambas apresentaram grande amplitude de DAP, BF, BC e consequentemente AGB, dos indivíduos amostrados (TABELA 2). Tal fato indica que a metodologia AGB A.I. não é acurada para estimar a biomassa por unidade de área de uma determinada espécie, se essa espécie possuir grande amplitude de variação de biomassa e DAP.

Por outro lado, os modelos que estimam a AGB por unidade de área, a partir da variável dominância, estimam com maior precisão a biomassa total acima do solo das espécies que apresentam grande variação de DAP, como por exemplo as citadas no parágrafo anterior. A justificativa para que essa metodologia seja considerada a mais precisa está relacionada a variável DoA. Como o ajuste é realizado para as árvores da mesma espécie, a amplitude de DAP entre todas as árvores da mesma espécie é retirada com o cálculo da DoA, ou seja, a variável utilizada para o ajuste. Trata-se de uma variável que engloba características da mesma espécie, retirando do modelo matemático de estimação toda a heterogeneidade relacionada a estruturas fenotípicas das árvores da mesma espécie, obtendo modelos mais precisos.

Quando estimada a biomassa acima do solo em kg.ha^{-1} (FIGURA 10), os modelos que estimam a biomassa das espécies, por unidade de área, apresentam estimativas mais precisas quando comparadas com a metodologia de cálculo para árvores individuais. Para modelos que estimam a biomassa individual das árvores, o cálculo da AGB.ha^{-1} é realizado pela soma da biomassa estimada para cada árvore, diferentemente dos modelos que estimam a biomassa por espécie, onde o cálculo da AGB.ha^{-1} é realizado pela soma da biomassa estimada por espécie. Como o número de espécie é menor do que o número de árvores, a propagação de erros, causado pela soma dos valores estimados, é menor para a metodologia

que estima a partir das espécies, tornando essa metodologia mais precisa do que a de cálculo por árvores individuais.

Dentre as duas metodologias propostas de estimar a biomassa por unidade de área, AGB DoA e AGB DoAe, a segunda apresenta valores mais precisos para estimar a $AGB.ha^{-1}$ como demonstrado na Figura 10. Como AGB DoAe apresenta como a variável a dominância das espécies em relação a área total, além do ajuste simultâneo onde a restrição exige que a soma da biomassa das espécies dentro da parcela seja igual a biomassa da parcela, a metodologia estima valores mais próximos aos valores reais observados.

Outra característica do método AGB DoAe, que o torna superior quando comparado ao método AGB DoA, é o fato de ser mais sensível a valores extremos, como pode-se observar na Figura 10. Nota-se que AGB DoAe alcançou a mesma variação dos valores observados, diferentemente do método AGB DoA que subestimou e do método AGB A.I. que superestimou, que por sua vez, demonstrou ser a metodologia com menor precisão.

Tais resultados não são comumente encontrados para florestas nativas. O presente trabalho demonstrou que, modelos não lineares ajustados para estimar a biomassa das espécies por hectare, conseguem retirar a variabilidade existente entre as espécies, gerando melhores estimadores quando comparados a modelos que estimam a biomassa para árvores individuais.

5. CONCLUSÕES

Modelos ajustados simultaneamente apresentam resultados precisos para estimar a biomassa total e dos componentes, de árvores individuais do bioma cerrado, fitofisionomia Parque Cerrado. Mesmo apresentando alta heterogeneidade quanto à distribuição da biomassa em seus componentes, os métodos NSUR e WNSUR mostraram ser acurados e consistentes biologicamente, devendo ser a metodologia preferida a ser empregada para estimar a biomassa de árvores individuais dessa fitofisionomia.

Valores estimados para a biomassa total e dos componentes de árvores individuais, pelo método WNSUR, não diferem significativamente do valor observado, o que torna o método preciso para estimar a biomassa das árvores individuais para a fitofisionomia Parque Cerrado. Já para a estimativa da biomassa das espécies, estimativas geradas com a condicionante de que a biomassa das parcelas amostradas deve ser igual a biomassa das espécies amostradas, não apresenta diferença significativa com o valor observado para a biomassa total em kg.ha^{-1} , tornando esse método preferível para esse tipo de estimativa.

A aplicação da variável dominância absoluta das espécies, em modelos para estimar a biomassa total e dos componentes em uma comunidade, se mostrou efetiva. Além de representar a própria característica da comunidade estudada, a dominância retira dos modelos individuais a heterogeneidade da arquitetura das árvores pertencentes a mesma espécie. A facilidade em estimar a biomassa de determinada espécie por unidade de área, é a principal motivação de uso desta metodologia.

O ajuste simultâneo com a condicionante de que a soma da biomassa das parcelas amostradas deve ser igual a soma das espécies amostradas em todas as parcelas, pode e deve ser uma metodologia a ser aplicada em inventário de biomassa em florestas nativas, por obter alta precisão e acurácia.

Os resultados com o método que estima a biomassa por unidade área, utilizando a variável dominância absoluta (AGB DoAe), diferem apenas 0,48% do valor encontrado com a amostragem destrutiva para AGB.ha^{-1} , além disso, mostrou ser sensível a variabilidades dos dados de biomassa provenientes de florestas heterogêneas, gerando estimativas de máximo e mínimo semelhantes aos valores observados.

A nova metodologia proposta, além de gerar resultados estatísticos mais precisos, mostrou que sua utilização deve ser preferida em inventários de biomassa em florestas nativas por apresentarem facilidades inerentes a estimativas de biomassa de uma determinada espécie, precisão para estimar a biomassa total das espécies e da área inventariada, além de, garantir um levantamento mais detalhado da área inventariada, sendo, portanto uma grande contribuição para projetos e pesquisas relacionadas às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017. 3 p.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANTÔNIO, N. et al. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 5, p. 895–906, 2007.
- APG III. **Angiosperm Phylogeny Group**. Na update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of Linnean Society*, 2009. 340 p.
- BEHLING, A. et al. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1759–1774, 2018.
- BISWAS, S.; MUKHOPADHYAY, S. C. Biodiversity assessment at Banka Forest Division, Banka, Bihar - A phytosociological approach. **Indian Journal of Tropical Biodiversity**, v. 25, n. 1, p. 59–64, 2017.
- BROAD, L. R. Allometry and growth. **Forest Science**, v. 44, p. 458–464, 1998.
- CARVALHO, J. P.; PARRESOL, B. R. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). **Forest Ecology and Management**, v. 179, n. 1–3, p. 269–276, 2003.
- CAVANAUGH, K. C. et al. Carbon storage in tropical forests correlates with taxonomic diversity and functional dominance on a global scale. **Global Ecology and Biogeography**, v. 23, n. 5, p. 563–573, 2014.
- CHIYENDA, S. S.; KOZAK, A. Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, p. 441–446, 1984.
- CUNIA, T.; BRIGGS, R. D. Forcing additivity of biomass tables - some empirical results. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, p. 376–384, 1984.
- DAMASCOS, M. A.; PRADO, C. H. B. A.; RONQUIM, C. C. Bud composition, branching patterns and leaf phenology in Cerrado woody species. **Annals of Botany**, v. 96, n. 6, p. 1075–1084, 2005.
- FAUSET, S. et al. Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. **Nature Communications**, v. 6, p. 1–9, 2015.
- FELFILI, J. M. **Avaliação do potencial florestal e dos resíduos de exploração das florestas do norte do Estado do Mato Grosso**. [s.l.] Universidade Federal de

Viçosa, 1983.

FELFILI, J. M. et al. Changes in the floristic composition of cerrado sensu stricto in Brazil over a nine-year period. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, p. 579–590, 2000.

FORRESTER, D. I. et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. **Forest Ecology and Management**, v. 396, p. 160–175, 2017.

GALLANT, A. R. **Nonlinear statistical models**. New York: John Wiley, 1987.

GENET, A. et al. Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 7, p. 1188–1202, 2011.

GIONGO, M. et al. Inventário de biomassa em um plantio de *Pinus elliottii* engelm. aos 23 anos de idade. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 3, p. 81–86, 2011.

GREENE, W. H. **Econometric analysis**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2008. 1178 p.

GREENE, W. H. **Econometric analysis**. Seventh: Pearson, 2012. 1232 p.

HARVEY, A. C. Estimating regression models with multiplicative heterocedasticity. **Econometrica**, v. 44, p. 461–465, 1976.

HENRY, M. et al. GlobAllomeTree: International platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. **IForest**, v. 6, n. 6, p. 326–330, 2013.

HU, Y. et al. Influence of tree species composition and community structure on carbon density in a subtropical forest. **PLoS ONE**, v. 10, n. 8, p. 1–9, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS -INPE - **Incremento anual de área desmatada no Cerrado Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/cerrado>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 39

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3 edição ed. Curitiba: UFPR, 2005.

KOZAK, A. Methods of ensuring additivity of biomass components by regression analyses. **Forest Chronicle**, v. 46, p. 402–406, 1970.

MIGUEL, E. P. et al. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerrado com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 829–839, 2015.

MORAIS, R. F.; MORAIS, F. F.; DE LIMA, J. F. Composição e estrutura da

comunidade arbórea e arbustiva em murundus no Pantanal de Poconé, Mato Grosso. **Revista Arvore**, v. 38, n. 3, p. 443–451, 2014.

NELSON, A. S. et al. Development and evaluation of aboveground small tree biomass models for naturally regenerated and planted species in eastern Maine, U.S.A. **Biomass and Bioenergy**, v. 68, p. 215–227, 2014.

NIKLAS, K. J. **Plant allometry: the scaling of forma and process**. University ed. Chicago: [s.n.].

OLIVEIRA FILHO, A. T. The vegetation of Brazilian “murundus” - the island-effect on the plant community. **Journal of Tropical Ecology**, v. 8, n. 4, p. 465–486, 1992.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado Sensu stricto do Distrito Federal. **Revista Arvore**, v. 35, n. 3, p. 527–538, 2011.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, n. 4, p. 573–593, 1999.

PARRESOL, B. R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 865–878, 2001.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba. 1997. 316 p.

POORTER, H. et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, p. 30–50, 2012.

POORTER, L. et al. Diversity enhances carbon storage in tropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, n. 11, p. 1314–1328, 2015.

REED, D. D.; GREEN, E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 15, n. 6, p. 1184–1187, 1985.

REZENDE, A. V et al. Comparison of mathematical models to volume, biomass and carbon stock estimation of the woody vegetation of a cerrado sensu stricto in Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 65–76, 2006.

RIBEIRO, J. F. et al. **Os principais tipos fitosionômicos da região dos Cerrados** Boletim de Pesquisa EMBRAPA/CPACPlanaltina - DF Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, , 1983.

RIBEIRO, S. C. et al. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 3, p. 491–499, 2011.

SANO, E. E. et al. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, n. 1–4, p. 113–124, 2010.

SANQUETTA, C. R. et al. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 40, n. 103, p. 361–370, 2014.

SANQUETTA, C. R. et al. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 8, p. 1099–1112, 2015.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

SATOO, T.; MADGWICK, H. A. **Forest Biomass**. 1982. 152 p.

SCHUMACHER, F. X.; HAL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, p. 719–734, 1933.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO -SFB -. **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biodísicos e sociambientais**. Brasília, DF: [s.n.].

SILVA, L. C. R. et al. Deciphering earth mound origins in central Brazil. **Plant and Soil**, v. 336, n. 1, p. 3–14, 2010.

SINGH, A. et al. Phytosociological status of Daksum range grasslands in Kashmir valley. v. 7, n. 4, p. 923–928, 2018.

SOUZA, A. L. DE;; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas : estrutura, dinâmica e manejo**. UFV: Viçosa. 2013, 332p.

TEAM, R. D. C. **R: A language and Environment for Statistical Computing**, 2017. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>

VELAZCO, S. J. E. et al. Floristic and phytosociology in a semideciduous seasonal forest - osununú private reserve, Misiones, Argentina [Florística e fitossociologia de uma floresta estacional semidecidual, reserva privada Osununú-Misiones, Argentina]. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 1–12, 2015.

WANG, J.; RICH, P. M.; PRICE, K. P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 11, p. 2345–2364, 2003.

WEISKITTEL, A. R. et al. A Call to Improve Methods for Estimating Tree Biomass for Regional and National Assessments. **Journal of Forestry**, v. 113, n. 4, p. 414–424, 2015.

WEST, G. B.; BROWN, J. H.; ENQUIST, B. J. A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology. **Science**, v. 276, n. 5309, p. 122–126, 1997.

WHITE, H. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. **Econometrica**, v. 48, n. 4, p. 817–838, 1980.

